

**Universitat
de Lleida**

DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES ÒPTIMS D'ESCANEIG DEL SENSOR LIDAR VELODYNE EN PLANTACIONS D'AMETLLERS SUPERINTENSUS

**TREBALL FINAL DE MÀSTER
MÀSTER EN ENGINYERIA AGRONÒMICA**

AUTOR: ALBERT ALSINA TEHÀS

**TUTOR: JORDI LLORENS CALVERAS
COTUTOR: ALEXANDRE ESCOLÀ AGUSTÍ**

LLEIDA, SETEMBRE DE 2020

Treball final de màster desenvolupat gràcies al projecte PagFRUIT: *Tecnologías de agricultura de precisión para optimizar el manejo del dosel foliar y la protección fitosanitaria sostenible en plantaciones frutales* del Programa Estatal I+D+i Orientada a los Restos de la Sociedad i finançat pel Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

Referència del Projecte: RTI2018-094222-B-100



Agraïments

En aquest apartat m'agradaria agrair la dedicació i col·laboració de totes aquelles persones que han participat en aquest projecte. Sense ells no hauria estat possible aconseguir els objectius plantejats.

- Als meus tutors, Jordi Llorens i Alexandre Escolà, per brindar-me l'oportunitat de participar en aquest projecte, per la seva implicació i pels coneixements que m'han aportat.
- Als diferents membres del Grup d'Investigació en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) que han sigut partícips d'aquest treball.
- A la meva família i amics, per donar-me suport de manera incondicional.
- A tots aquells que no he anomenat però que també han participat d'alguna forma en aquest projecte experimental.

A tots vosaltres, moltes gràcies!

Índex

1. Introducció	7
2. Objectius	10
3. Materials i Mètodes	11
3.1. Descripció del sistema d'escaneig	11
3.1.1. Sensor LiDAR (Light Detection and Ranging)	11
3.1.2. Georeferenciació de les dades	14
3.1.3. Plataforma automotriu	15
3.1.4. Sistema d'adquisició de dades	16
3.2. Adquisició de les dades	17
3.3. Anàlisi i maneig de les dades	20
3.3.1. Codi d'anàlisi per al càlcul d'amplades, alçades i seccions	24
3.3.2. Velocitat òptima d'avanç del sistema d'escaneig	31
3.3.3. Combinació òptima de feixos del sensor	32
3.4. Tractament estadístic de les dades	34
3.5. Avaluació econòmica	36
3.6. Programari utilitzat	37
4. Resultats	38
4.1. Combinació òptima de feixos	38
4.1.1. Resultats per paràmetres agronòmics estudiats	38
4.1.1.1. Amplada de capçada	38
4.1.1.2. Alçada de capçada	40
4.1.1.3. Secció transversal de capçada	42
4.1.1.3.1. Mètodes de càlcul tradicionals	42
4.1.1.3.2. Mètodes de càlcul proposats	48
4.1.2. Resum de les combinacions de feixos estudiades	59
4.2. Elecció del nou mètode de càlcul de la secció transversal	63
4.3. Velocitat òptima d'escaneig	67
4.4. Anàlisi dels paràmetres vegetatius de les files completes	68
4.4.1. Fila d'ametllers número 43	68
4.4.2. Fila d'ametllers número 44	70
4.4.3. Fila d'ametllers número 45	72
5. Discussió	74
6. Avaluació econòmica	76
7. Conclusions	79
8. Referències bibliogràfiques	81

Índex de Figures

Figura 1. Evolució del preu de venda (€/kg) de l'ametlla des del 2010 fins al 2020, per a les varietats Comuna, Llargueta i Marcona. <i>Font: Llotja de Reus.</i>	7
Figura 2. Sistema làser mòbil terrestre utilitzat amb els components electrònics que el configuren.....	11
Figura 3. Explicació gràfica esquemàtica del principi de funcionament d'un sensor LiDAR <i>time-of-flight</i> ...	12
Figura 4. Sensor LiDAR Velodyne VLP-16. <i>Font: www.velodynelidar.com.</i>	12
Figura 5. Representació dels canals del sensor Velodyne VLP-16. <i>Font: User Manual Velodyne VLP-16</i>	13
Figura 6. Receptor situat en un punt fix (base). Marca Leica Model RTK 1200. <i>Font: Jaume Arnó Satorra.</i>	14
Figura 7. Distàncies (offset) entre el sensor LiDAR i l'antena del receptor GNSS (rover). <i>Font: Jaume Arnó Satorra.</i>	15
Figura 8. Perfil metàl·lic amb l'antena GNSS i el sensor LiDAR. <i>Font: Jaume Arnó Satorra.</i>	15
Figura 9. Ordinador Getac V110 utilitzat.	16
Figura 10. Representació de les files 43, 44 i 45 escanejades a la finca Alrasa durant l'assaig de camp.	17
Figura 11. Representació gràfica del sistema d'escaneig i del seu pas per les fileres d'ametllers. <i>Font figura arbre: pngocean.com</i>	19
Figura 12. Representació de les dades captades pel sensor Velodyne Lidar VLP-16 (núvol de punts).	21
Figura 13. a) Escaneig des del centre del carrer esquerre de la fila 43; b) Escaneig des del centre del carrer dret de la fila 43; c) Composició completa del núvol de punts d'una fila 43.....	21
Figura 14. Expressió matemàtica del mètode de neteja automàtica SOR (<i>Statistical Outlier Removal</i>)....	22
Figura 15. Representació dels trams de fila utilitzats per determinar els paràmetres del mètode SOR. a) Original; b) $n\text{Sigma}=2,50$; $n\text{Points}=6$; c) $n\text{Sigma}=2,50$; $n\text{Points}=10$; d) $n\text{Sigma}=3,00$; $n\text{Points}=6$; e) $n\text{Sigma}=3,00$; $n\text{Points}=10$	23
Figura 16. Representació d'un núvol de punts original projectat sobre el pla X-Y.	25
Figura 17. Representació d'un núvol de punts amb les coordenades girades sobre l'eix X.	26
Figura 18. Representació gràfica d'un prisma d'anàlisi.....	26
Figura 19. Representació gràfica de l'anàlisi d'una fila. De color blau els punts inicials i finals d'anàlisi i de color verd les llesques d'escaneig.	27
Figura 20. Secció transversal en un punt de la fila analitzada. La línia blava correspon al càlcul de la secció mitjançant el mètode ConvexHull . L'acumulació de prismes de color groc fan referència a la secció transversal calculada amb l' amplada màxima . L'acumulació de prismes de color vermell fan referència a la secció transversal calculada amb l' amplada percentil 95 %	28
Figura 21. Representació gràfica del mètode Retícula amb diferents mides de cel·la: a) 0,05 m; b) 0,3 m; c) 0,5 m.....	29
Figura 22. Representació gràfica del mètode <i>Alpha Convex Hull</i> amb diferents valors d'alfa (α). a) 0,05; b) 0,3; c) 0,5.....	29
Figura 23. Seqüència de programes utilitzats.	37

Figura 24. Representació gràfica de l'amplada màxima de capçada per parelles d'angles. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	38
Figura 25. Representació gràfica de l'alçada màxima de capçada per parelles d'angles. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	40
Figura 26. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el mètode tradicional <i>ConexHull</i> . A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles. .	42
Figura 27. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el mètode tradicional amplada màxima. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	44
Figura 28. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el mètode tradicional amplada percentil 95. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	46
Figura 29. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul <i>Alpha Convex Hull</i> amb $\alpha=0,05$. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	48
Figura 30. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul <i>Alpha Convex Hull</i> amb $\alpha=0,1$. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	50
Figura 31. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul <i>Alpha Convex Hull</i> amb $\alpha=0,2$. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	52
Figura 32. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul <i>Retícula</i> amb mida de la cel·la de 0,05 m. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	54
Figura 33. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul <i>Retícula</i> amb mida de la cel·la de 0,1 m. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	56
Figura 34. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul <i>Retícula</i> amb mida de la cel·la de 0,2 m. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.	58
Figura 35. Vista frontal (pla Y-Z) dels punts obtinguts d'una secció transversal de capçada de 10 cm de profunditat segons les diferents combinacions de feixos estudiades.....	62
Figura 36. Representació gràfica de la secció transversal segons el mètode de càlcul (tradicionals i proposats) per a les combinacions de feixos: a) -15° a $+15^\circ$ (Amb rang d'angles); b) -13° a $+13^\circ$ (Amb rang d'angles); c) -11° a $+11^\circ$ (Amb rang d'angles).	64
Figura 37. Correlació entre els mètodes de càlcul de la secció transversal per a la combinació de feixos -15° a $+15^\circ$ (Amb rang). a) <i>Retícula</i> 0,05 i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,5; b) <i>Retícula</i> 0,05 i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1; c) <i>Retícula</i> 0,05 i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,2; d) <i>Retícula</i> 0,05 i <i>Retícula</i> 0,1; e) <i>Retícula</i> 0,05 i <i>Retícula</i> 0,2. .	66

Figura 38. Secció transversal de capçada, calculada amb el mètode *Alpha convex Hull* 0,2, segons les tres velocitats d'avanç estudiades per a les combinacions de feixos **a)** -1 i 1 i **b)** -15 a 15 amb rang d'angles.67

Figura 39. Paràmetres vegetatius de la fila 43 per a les tres dates d'escaneig. **a)** Diagrama de barres de l'amplada màxima i **b)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **c)** Diagrama de barres de l'alçada màxima i **d)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **d)** Diagrama de barres de la secció transversal de capçada i **f)** Diagrama de caixes de les dades estudiades.69

Figura 40. Paràmetres vegetatius de la fila 44 per a les tres dates d'escaneig. **a)** Diagrama de barres de l'amplada màxima i **b)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **c)** Diagrama de barres de l'alçada màxima i **d)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **d)** Diagrama de barres de la secció transversal de capçada i **f)** Diagrama de caixes de les dades estudiades.71

Figura 41. Paràmetres vegetatius de la fila 45 per a les tres dates d'escaneig. **a)** Diagrama de barres de l'amplada màxima i **b)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **c)** Diagrama de barres de l'alçada màxima i **d)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **d)** Diagrama de barres de la secció transversal de capçada i **f)** Diagrama de caixes de les dades estudiades.73

Índex de Taules

Taula 1. Característiques tècniques del sensor Velodyne VLP-16. <i>Font: User Manual Velodyne VLP-16.</i>	12
Taula 2. Angle d'incidència de cada canal del sensor Velodyne VLP-16. <i>Font: User Manual Velodyne VLP-16.</i>	13
Taula 3. Offset de distàncies entre el sensor LiDAR i el sistema GNSS.	14
Taula 4: Dates d'escaneig de les files 43, 44 i 45 de la finca Alrasa.	17
Taula 5. Matriu de sortida del programari VeloView. Informació disponible per a cada punt.	20
Taula 6. Diferents casos estudiats per determinar el valor nPoints i nSigma per al mètode SOR.	22
Taula 7. Coordenades X, Y UTM 31T ETRS89 inicials i finals d'anàlisi de cada fila escanejada.	24
Taula 8. Velocitats teòriques d'avanç expressades en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	31
Taula 9. Identificació dels anàlisis realitzats segons les combinacions de feixos del sensor Velodyne VLP-16. De color blau variable RangAngles \rightarrow NO i de color groc RangAngles \rightarrow SI.	32
Taula 10. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de l'amplada màxima mitjana.	39
Taula 11. Separació de mitjanes d'amplada màxima mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	39
Taula 12. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de l'alçada màxima mitjana.	41
Taula 13. Separació de mitjanes d'alçada màxima mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	41
Taula 14. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>ConvexHull</i> mitjana.	43
Taula 15. Separació de mitjanes de la secció <i>ConvexHull</i> mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	43
Taula 16. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció amplada màxima mitjana.	44
Taula 17. Separació de mitjanes de la secció amplada màxima mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	45
Taula 18. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció amplada percentil 95 mitjana.	47
Taula 19. Separació de mitjanes de la secció amplada percentil 95 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	47
Taula 20. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,05 mitjana.	49
Taula 21. Separació de mitjanes de la secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,05 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	49
Taula 22. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1 mitjana.	50

Taula 23. Separació de mitjanes de la secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.....	51
Taula 24. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,2 mitjana.....	52
Taula 25. Separació de mitjanes de la secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,2 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.....	53
Taula 26. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>Retícula</i> 0,05 mitjana.	55
Taula 27. Separació de mitjanes de la secció <i>Retícula</i> 0,05 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	55
Taula 28. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>Retícula</i> 0,1 mitjana.	56
Taula 29. Separació de mitjanes de la secció <i>Retícula</i> 0,1 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	57
Taula 30. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció <i>Retícula</i> 0,2 mitjana.	58
Taula 31. Separació de mitjanes de la secció <i>Retícula</i> 0,2 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.	59
Taula 32. Ordre del la combinació de feixos per a cada mètode de càlcul utilitzant un nombre de mostres aleatòries (<i>Power Calculation</i> : Nivell de significació=0,05 i Potència=0,90). Paràmetre estudiat: Secció transversal mitjana (m ²).	61
Taula 33. Separació de mitjanes de la secció transversal mitjana de capçada en funció de les combinacions de feixos i dels nous mètodes de càlcul.	65
Taula 34. Separació de mitjanes de l'anàlisi de velocitats d'avanç del sistema d'escaneig per a la combinació de feixos -15° a +15° (Amb rang). Paràmetre estudiat: Secció transversal de capçada.....	67
Taula 35. Comparació de les mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats de la fila 43 per a cada data d'escaneig.....	68
Taula 36. Comparació de les mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats de la fila 44 per a cada data d'escaneig.....	70
Taula 37. Comparació de les mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats de la fila 43 per a cada data d'escaneig.....	72
Taula 38: Pagament d'inversió inicial.....	76
Taula 39: Despeses per a l'escaneig d'una plantació superintensiva d'ametllers.....	77
Taula 40: Valoració econòmica (€).....	78

1. Introducció

Durant les darreres campanyes agrícoles, la superfície agrícola dedicada a la producció de fruits secs ha augmentat considerablement. Espanya és consolidada com el tercer país productor d'ametlla a nivell mundial, darrera d'Estats Units i Austràlia, i el primer de la Unió Europea, segons les últimes valoracions estadístiques publicades per la FAO (2018). Aquest augment en la producció, juntament a una major demanda del producte, ha ajudat que el preu de venda, expressat en €/kg, hagi incrementat satisfactòriament, aconseguint el màxim llindar l'any 2016, en funció de la varietat d'ametlla (**Figura 1**).

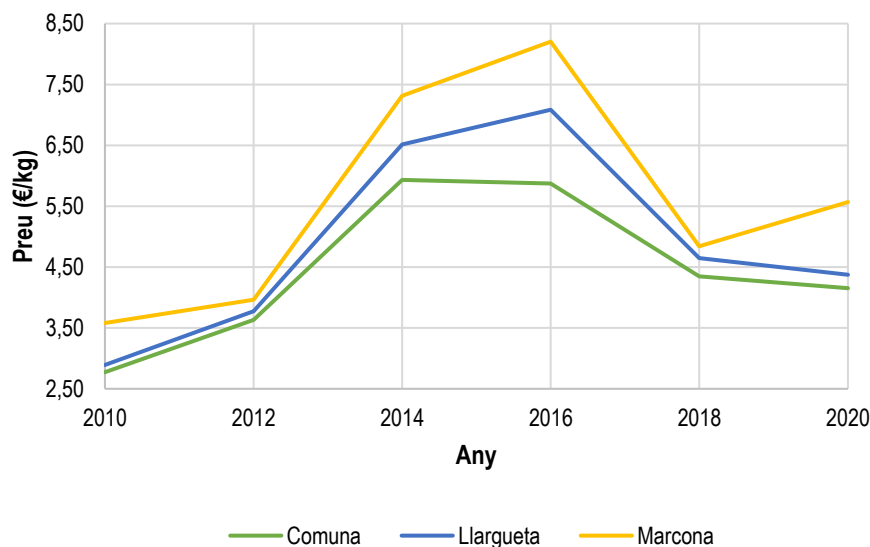


Figura 1. Evolució del preu de venda (€/kg) de l'ametlla des del 2010 fins al 2020, per a les varietats Comuna, Llangueta i Marcona. Font: Llotja de Reus.

Les plantacions de fruita seca, tot i el preu satisfactori de venda del producte, tenen un marge de benefici molt ajustat, ja que les despeses per a produir una tona d'ametlles són molt elevades. A més a més, tot i haver-hi una forta mecanització i tecnificació del sector, la majoria d'agricultors continuen gestionant les seves plantacions de forma tradicional i sense tenir en compte la variabilitat espacial i temporal de la parcel·la (Pierpaoli et al., 2013). En aquest sentit, és necessari la utilització de noves tecnologies que permetin obtenir dades de camp per a caracteritzar la vegetació i que aquesta informació sigui utilitzada per part dels agricultors i dels assessors de camp com una eina més per a ajudar a prendre decisions de maneig.

Des de ja fa uns anys, s'estan utilitzant diferents tècniques per aconseguir una "radiografia" completa dels cultius. Per una banda, la utilització de fotogrametria i fotografia digital mitjançant càmeres RGB (Red-Green-Blue) les quals són accessibles econòmicament. Per altra banda, també s'utilitzen sensors 3D més complexos anomenats LiDAR (light detection and ranging), basats amb el principi conegut com a ToF (*time-of-flight*) per a capturar dades. La informació que es pot extreure d'aquests sistemes és molt variable, des de característiques geomètriques d'una

fila ([Ribes-dasi et al., 2009](#)), com per exemple l'amplada, l'alçada, la secció transversal o el volum ([Underwood et al., 2016](#)), fins a característiques estructurals com l'índex d'àrea foliar (LAI) ([Arnó et al., 2013](#)) o la porositat.

Disposant d'aquesta radiografia de les parcel·les es pot aplicar el concepte d'Agricultura de Precisió, i ajustar el consum de recursos en diferents zones de maneig segons la variabilitat espacial i temporal de la parcel·la en qüestió ([Rosell and Sanz, 2012](#)). Per exemple, ajustar les dosis de fertilitzants segons els requisits nutricionals dels arbres, aplicar productes fitosanitaris segons la presència o absència de plagues i malalties i ajustar els intervals i dosis de reg segons la disponibilitat d'aigua al sòl, entre altres.

L'ajust dels productes fitosanitaris per a cada zona de maneig té un doble efecte positiu. Per una banda, des d'un punt de vista econòmic, la rendibilitat de les explotacions pot augmentar, ja que s'obra la possibilitat d'incrementar produccions i millorar la qualitat dels fruits. Per una altra banda, des d'un punt de vista ambiental, les explotacions poden ser més sostenibles, ja que, en bones condicions d'aplicació, es poden reduir les pèrdues de les matèries actives aplicades.

El Grup de Recerca en AgròTICa i Agricultura de Precisió (GRAP) de la Universitat de Lleida, fa anys que treballa en sistemes de caracterització de la vegetació mitjançant sensors LiDAR (Light Detection and Ranging). L'any 2018, diferents membres del grup van escanejar tres files d'una plantació superintensiva d'ametllers de la finca d'Alrasa (Raïmat, Lleida) amb un sistema d'escaneig làser mòbil terrestre (*mobile terrestrial laser scanner, MTLs*), el qual portava instal·lat el sensor LiDAR VLP-16. L'escaneig es va repetir a les dates del 13/06/2018, 13/07/2018 i 01/08/2018, escanejant cada una de les fileres a dues velocitats d'avanç diferents.

En aquest treball de caràcter experimental, s'han analitzat les dades que es van obtenir l'any 2018 durant els escanejos de camp. Alguns factors de maneig com l'alçada en què està situat el sensor, la velocitat d'avanç del mecanisme i el nombre de feixos de llum del sensor són determinants per aconseguir captar dades el màxim versemblants possibles. Més enllà de la tecnologia utilitzada, també és important disposar d'un mètode d'anàlisi de les dades de camps que sigui robust i fiable. Per aquest motiu, s'ha adaptat un codi d'anàlisi desenvolupat per diferents membres del GRAP mitjançant la plataforma gratuïta *RStudio* ([Rstudio PBC, Joseph J. Allaire, 2009](#)) segons les necessitats que presenta aquest projecte.

En aquest treball no es disposa d'un valor de veritat terreny i per tant els resultats obtinguts no es poden contrastar amb els valors reals, d'altra banda molt difícils de mesurar manualment. Tanmateix, sí que es té experiència amb aquest tipus de sistemes de mesura i, per tant, es treballa

amb la hipòtesi de partida de què els resultats que s'obtenen amb la totalitat de feixos del sensor (16 feixos) permeten obtenir una millor caracterització de la vegetació.

Un cop validada la configuració del sistema d'escaneig i testat el mètode de càlcul i d'anàlisi de les dades, s'ha procedit a analitzar la informació de les tres files completes per tal d'observar si entre les diferents dates d'escaneig hi van haver canvis significatius en les característiques geomètriques de la capçada estudiades en aquest projecte (amplada, alçada i secció transversal).

Finalment, per concloure el treball, s'ha dut a terme una avaluació econòmica per a una empresa que volgués oferir aquest servei a un preu raonable per al sector frutícola. S'ha tingut en compte la inversió inicial i les despeses unitàries i s'ha determinat quantes hectàrees hauria d'escanejar i processar anualment per a que el servei sigui rendible.

2. Objectius

Tenint en compte quina és la situació dels sistemes d'escaneig de vegetació tal com s'ha explicat a la Introducció, es pretenen aconseguir els següents objectius en aquest treball experimental:

- a. Establir la combinació de feixos làser òptima del sensor Velodyne per a calcular l'amplada, l'alçada i la secció transversal de les fileres escanejades.
- b. Establir el mètode de càlcul que permeti obtenir mesures de secció transversal de fila més fiables.
- c. Adaptar el codi d'anàlisi i de càlcul de paràmetres vegetatius als requisits que presenta aquest treball experimental.
- d. Determinar la velocitat d'avanç òptima del sistema d'escaneig.
- e. Estimar quin és el cost d'escaneig per hectàrea i a quin preu hauria d'oferir una empresa a tercers aquest servei.

3. Materials i Mètodes

3.1. Descripció del sistema d'escaneig

Per a la caracterització dels ametllers es va utilitzar un sistema làser mòbil terrestre (*mobile terrestrial laser scanner*) basat en un sensor LiDAR, juntament amb un receptor de sistema satel·litari de navegació global (SSNG o GNSS, en anglès) per a georeferenciar les dades obtingudes (**Figura 2**). Ambdós equips anaven connectats a un ordinador portàtil de camp per a enregistrar la informació mitjançant un programari desenvolupat amb llenguatge gràfic LabVIEW. Tot aquest conjunt estava instal·lat sobre una plataforma automotriu que avançava a velocitat constant durant l'escaneig de les fileres d'ametllers.

A la Figura 2 es detallen amb major claredat els materials utilitzats en aquest sistema.

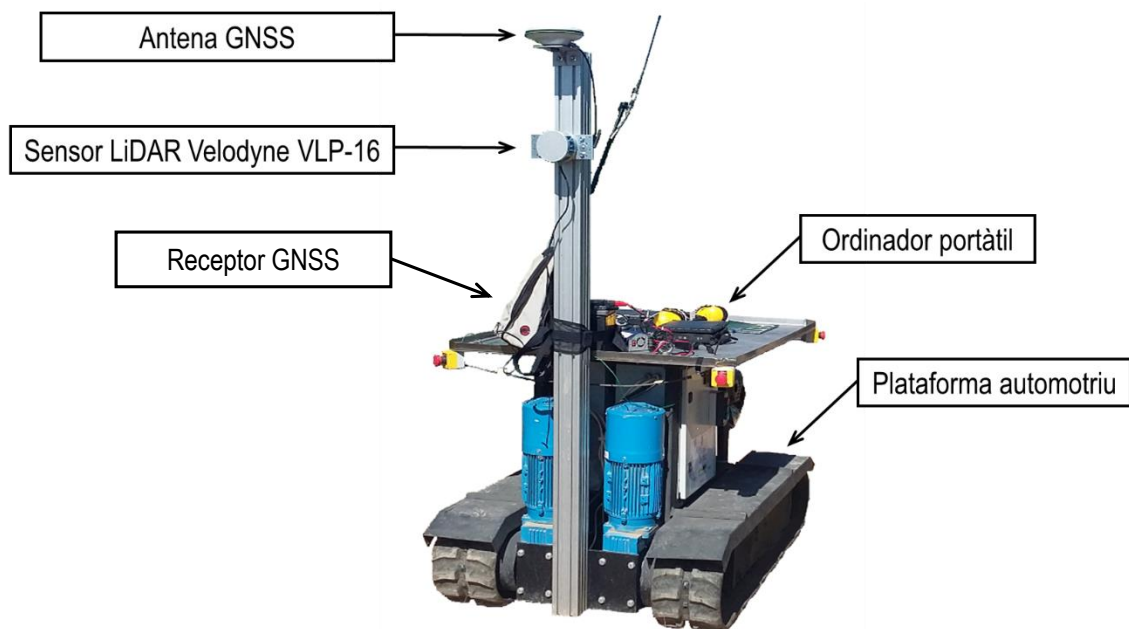


Figura 2. Sistema làser mòbil terrestre utilitzat amb els components electrònics que el configuren.

3.1.1. Sensor LiDAR (Light Detection and Ranging)

El sensor utilitzat en aquest treball és un sensor òptic que es basa amb el principi de funcionament anomenat *time-of-flight*. Aquest principi, consisteix a calcular quin és el temps de vol entre l'emissió d'un pols intermitent de llum infraroja sobre una superfície i la recepció del mateix feix al receptor del sensor (**Figura 3**). D'aquesta forma es pot conèixer amb exactitud quina és la distància entre la posició del sensor i la de l'objecte en el qual rebota el feix de llum. A més a més, el model utilitzat en aquest treball també permet calcular l'energia del feix que retorna des de l'objecte on impacta, anomenada intensitat. Tanmateix, aquesta variable no es té en compte en aquest treball.

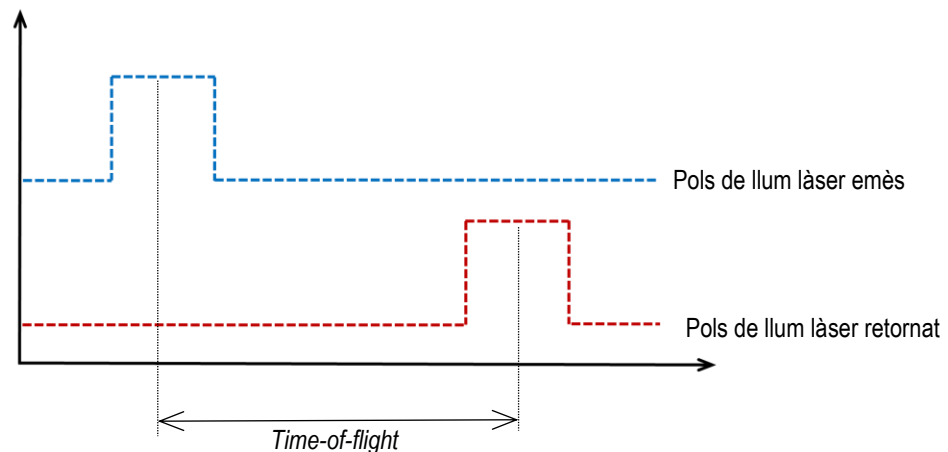


Figura 3. Explicació gràfica esquemàtica del principi de funcionament d'un sensor LiDAR *time-of-flight*.

Es va utilitzar el model VLP-16 de la marca Velodyne LiDAR (**Figura 4**) per dur a terme l'assaig de camp. Aquest aparell, precís i lleuger, amb un pes aproximat d'1 kg i amb 16 feixos de llum (**Figura 5**), permet capturar entre 300.000 punts per segon i 600.000 punts per segon, depenent de la configuració de l'equip. A més a més, disposa d'un rang de mesura de 100 m i d'un camp de visió en l'eix vertical de 30° i en l'eix horitzontal de 360°. Aquestes característiques que el configuren (**Taula 1**) garanteixen una caracterització tridimensional dels objectes escanejats.



Figura 4. Sensor LiDAR Velodyne VLP-16. Font: www.velodynelidar.com.

Taula 1. Característiques tècniques del sensor Velodyne VLP-16. Font: *User Manual Velodyne VLP-16*.

Longitud d'ona de la llum emesa (λ):	903 nm
Principi de funcionament:	<i>Time-of-flight</i>
Canals:	16
Rang de mesura:	100 m
Precisió rang de mesura:	0,03 m
Camp de visió vertical:	+15° a -15° (30°)
Resolució angular vertical:	2°
Camp de visió horitzontal:	360°
Resolució angular horitzontal configurable:	0,10° a 0,40°
Freqüència d'escaneig:	5 Hz – 20 Hz
Pes	0,83 kg

Taula 2. Angle d'incidència de cada canal del sensor Velodyne VLP-16. *Font: User Manual Velodyne VLP-16.*

Canal del sensor	Angle (°)
0	-15
1	1
2	-13
3	3
4	-11
5	5
6	-9
7	7
8	-7
9	9
10	-5
11	11
12	-3
13	13
14	-1
15	15

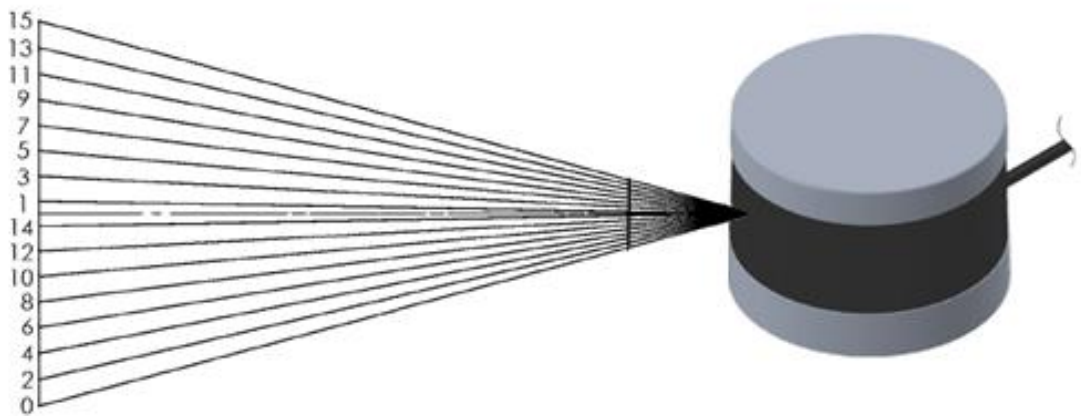


Figura 5. Representació dels canals del sensor Velodyne VLP-16. *Font: User Manual Velodyne VLP-16*

Cada punt obtingut durant l'escaneig de la parcel·la d'assaig consisteix en una distància (mòdul) i dos angles (arguments), un d'horitzontal i un de vertical respecte el centre òptic del sensor. Per tant, cada punt s'expressa en coordenades polars locals. Per a aconseguir georeferenciar els punts en coordenades absolutes, era necessari convertir les coordenades polars a rectangulars i utilitzar, de forma simultània, un receptor GNSS RTK, el qual es descriu al següent apartat.

3.1.2. Georeferenciació de les dades

Per tal de georeferenciar en coordenades absolutes les dades obtingues pel sensor LiDAR es va utilitzar un equip de posicionament de la marca Leica, concretament el model RTK 1200, de doble freqüència (L1 i L2) i capaç de rebre senyals de ràdio dels sistemes satel·litaris GPS (Global Positioning System) i GLONASS (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema).

Aquest aparell disposava d'una correcció terrestre de tipus RTK (Real-Time-Kinematics), aconseguint així una exactitud centimètrica (entre 1 i 2 cm). Aquesta exactitud, l'aconsegueix mitjançant la utilització de dos receptors. Un d'ells s'anomena base (**Figura 6**) i estava estacionat sobre un punt fix de coordenades conegudes. L'altre, estava instal·lat sobre la plataforma automotriu i s'anomena *rover*, situat a certa distància coneguda (*offset*) respecte del sensor LiDAR, segons la data d'escaneig (**Figura 7, Taula 3**). La comunicació entre la base i el *rover* es feia mitjançant senyal ràdio i permetia l'enviament de la correcció de les coordenades.

El receptor es va connectar a l'ordinador de camp mitjançant el port de comunicacions sèrie RS-232 per a poder realitzar l'adquisició de les coordenades.



Figura 6. Receptor situat en un punt fix (base). Marca Leica Model RTK 1200. Font: Jaume Arnó Satorra.

Taula 3. Offset de distàncies entre el sensor LiDAR i el sistema GNSS.

Data escaneig	Offset X (m)	Offset Y (m)	Offset Z (m)
13/06/2018	0,00	0,31	0,06
13/07/2018	0,00	0,35	0,06
01/08/2018	0,00	0,35	0,06

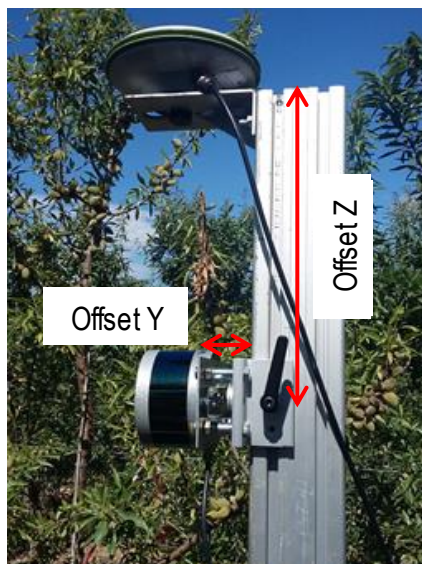


Figura 7. Distàncies (offset) entre el sensor LiDAR i l'antena del receptor GNSS (rover). *Font: Jaume Arnó Satorra.*

3.1.3. Plataforma automotriu

Per a facilitar l'adquisició de les dades a velocitat constant es va utilitzar una plataforma automotriu accionada per un motor de combustió i controlada per un comandament. Aquesta, disposava de dues erugues per a facilitar la tracció de l'equip en terrenys complicats. A l'extrem davanter de la plataforma es va instal·lar un perfil metàl·lic on estaven subjectats el sensor LiDAR i l'antena (rover) del receptor GNSS (**Figura 8**).



Figura 8. Perfil metàl·lic amb l'antena GNSS i el sensor LiDAR. *Font: Jaume Arnó Satorra.*

3.1.4. Sistema d'adquisició de dades

Per a realitzar l'adquisició de les dades es van utilitzar dos ordinadors de la marca Getac model V110 (**Figura 9**). En un d'ells s'executava un software desenvolupat amb la plataforma LabView (National Instruments) el qual permetia emmagatzemar les dades del sistema GNSS en temps real. A l'altre, s'enregistraven les lectures del sensor LiDAR mitjançant el programa VeloView, propi de la casa del sensor.

Per la transferència de les dades adquirides, el sensor Velodyne es mantenia connectat mitjançant el port RJ-45 (*Ethernet*). Per altra banda, les lectures del sistema de posicionament es traslladaven amb el port de comunicacions RS-232.



Figura 9. Ordinador Getac V110 utilitzat.

3.2. Adquisició de les dades

L'assaig de camp es va dur a terme a la finca Alrasa (Raïmat, Lleida) on hi ha una plantació d'ametllers de l'any 2016 de la varietat Lauranne Avjor (INRA francès, creuament Ferragnès per Tuono) i portampelt GF-677 (INRA francès, creuament préssec per ametller) amb un marc de plantació superintensiu (3,2 m x 1,5 m).

L'any 2018, diversos membres del GRAP, van escanejar, en tres dates diferents (**Taula 4**), un tram de 87 metres lineals de tres fileres d'ametllers, anomenades en aquest treball com a files 43, 44 i 45, a dues velocitats d'avanç mitjançant el sistema mòbil d'escaneig terrestre (**Figura 10**). Aquestes fileres d'ametllers no havien estat podades amb els mecanismes de poda convencional, sinó que es van deixar créixer tots els nous brots vegetatius amb l'objectiu de disposar de més superfície foliar i poder validar les aptituds del sensor. Això es deu al fet que els gestors de la finca Alrasa tenien interès a analitzar el potencial del cultiu i observar com es comportava en condicions de no poda. A més a més, cal destacar que en aquestes mateixes files també es va dur a terme un assaig de fitorreguladors. Tanmateix, en aquest treball no es determina l'eficàcia d'aquests productes.

Taula 4: Dates d'escaneig de les files 43, 44 i 45 de la finca Alrasa.

1r escaneig	13/06/2018
2n escaneig	13/07/2018
3r escaneig	01/08/2018

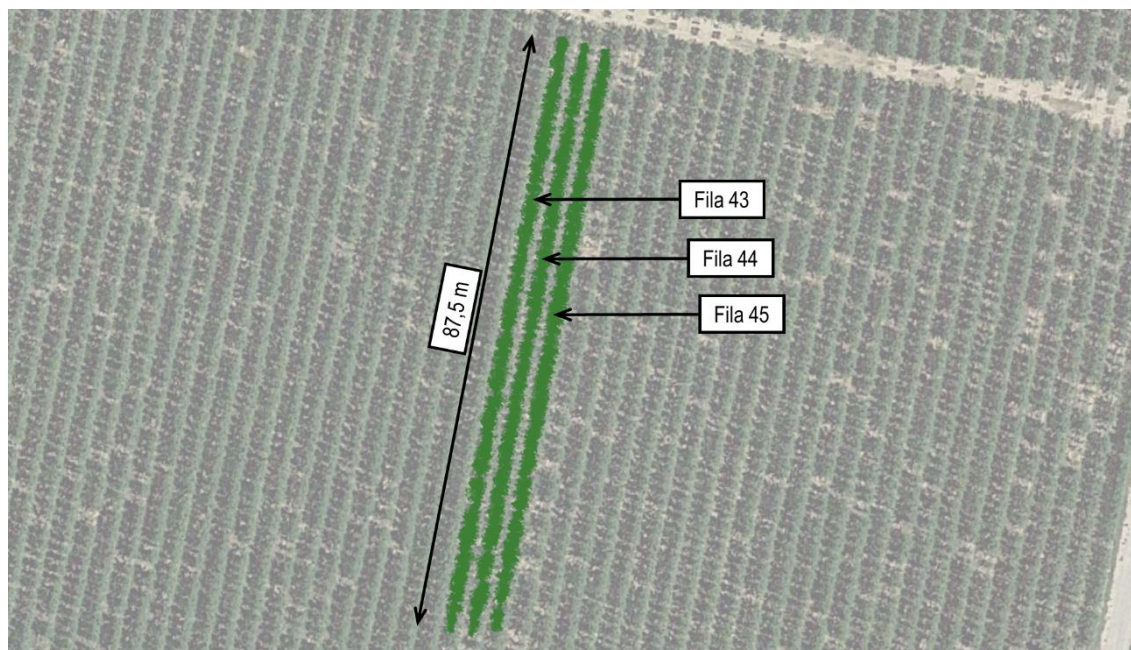


Figura 10. Representació de les files 43, 44 i 45 escanejades a la finca Alrasa durant l'assaig de camp.

El protocol que es va utilitzar per a les tres dates era escanejar les fileres, des del centre del carrer adjacent dret i des del centre del carrer adjacent esquerre (**Figura 11**) a una velocitat constant d'avanç d' $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ en direcció sud-oest i de $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ en direcció nord-est. D'aquesta manera, es passava dues vegades pel mateix carrer amb l'equip d'escaneig. A més a més, per a totes les dates es va instal·lar el sensor a una alçada d'1,54 m respecte al terra, aconseguint així que el centre òptic del sensor estigués situat a una alçada tal que minimitzés les ombres dels feixos de llum i el sensor tingués la màxima visibilitat de la vegetació escanejada. Aquesta posició d'escaneig es va mantenir a les tres dates.

A la **Figura 11** es mostra una representació gràfica de com es va dur a terme l'escaneig d'una fila.

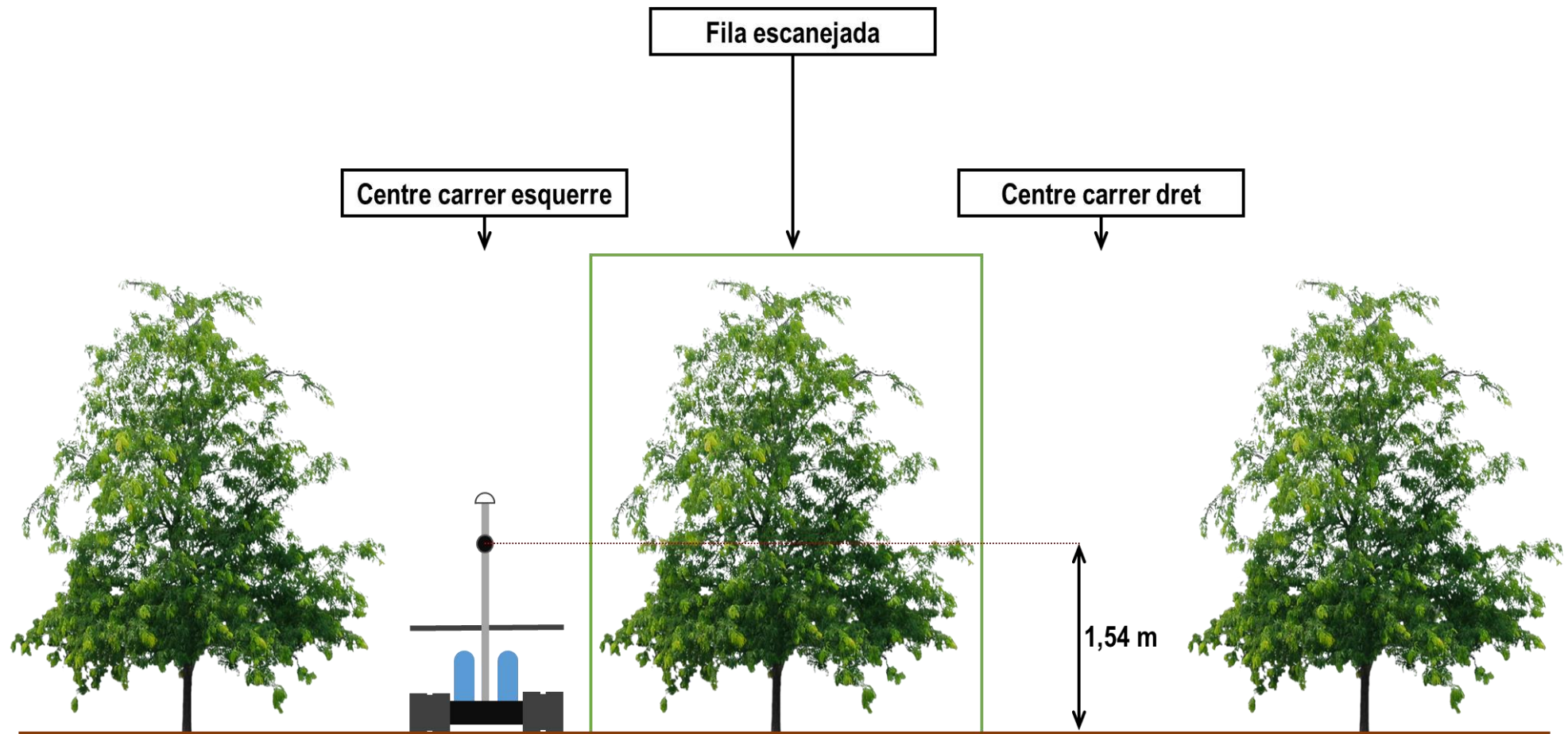


Figura 11. Representació gràfica del sistema d'escaneig i del seu pas per les fileres d'ametllers. Font figura arbre: pngocean.com

3.3. Anàlisi i maneig de les dades

Una vegada es van obtenir les dades de camp es va procedir a adequar-les al format necessari per poder-les analitzar. En primer lloc, directament del sensor i sense cap pas previ, es van obtenir diversos arxius amb extensió *.pcap* per a cada data d'escaneig, concretament 4 arxius corresponents a velocitat lenta i 4 més a velocitat ràpida, per tal de cobrir les tres files (**Figura 11**). Aquests tipus d'arxius només es podien llegir amb el software VeloView, desenvolupat per la casa comercial que va fabricar el sensor Velodyne LiDAR VLP-16. Aquest programari permetia visualitzar un núvol de punts tridimensional amb soroll, és a dir, amb presència de la coberta vegetal i amb punts allunyats de les files escanejades. A més a més, també permetia conèixer, per a cada lectura, les coordenades polars respecte al centre òptic del sensor, la distància entre el punt d'impacte i l'aparell i quin havia estat l'angle d'incidència, entre altres (**Taula 5**). Finalment, també oferia la possibilitat d'exportar cada escaneig en format *.csv*, necessari per a seguir amb el maneig de les dades. Per exemple, si l'escaneig d'una fila des d'un costat contenia 1500 escanejos, s'obtenien 1500 arxius en format *.csv*.

Taula 5. Matriu de sortida del programari VeloView. Informació disponible per a cada punt.

Point ID	X	Y	Z	azimuth	distance_m	intensity	laser_id	vertical_angle
0	1.002	1.033	0.386	4414	1.490	2	15	15.000
1	1.041	1.065	0.399	4433	1.542	13	15	15.000
2	1.045	1.062	0.399	4454	1.542	15	15	15.000
3	1.063	1.073	0.349	4472	1.550	2	13	13.000
4	1.055	1.065	0.402	4473	1.552	18	15	15.000
5	1.027	1.029	0.336	4492	1.492	5	13	13.000
6	1.052	1.054	0.399	4493	1.542	17	15	15.000
7	1.188	1.183	0.326	4510	1.708	1	11	11.000
8	1.030	1.026	0.336	4512	1.492	6	13	13.000
9	1.053	1.048	0.398	4513	1.538	31	15	15.000
10	1.175	1.163	0.321	4530	1.684	7	11	11.000
11	1.063	1.051	0.345	4532	1.534	9	13	13.000
12	1.064	1.051	0.401	4534	1.548	37	15	15.000
13	1.171	1.150	0.319	4550	1.672	4	11	11.000
14	1.062	1.043	0.344	4552	1.528	16	13	13.000
15	1.056	1.037	0.397	4553	1.532	25	15	15.000
16	1.192	1.163	0.324	4570	1.696	3	11	11.000
17	1.087	1.060	0.407	4573	1.572	22	15	15.000
18	1.178	1.143	0.319	4588	1.672	1	11	11.000

Seguidament, es va executar un codi desenvolupat per diversos membres del grup de recerca amb la plataforma i llenguatge de programació MATLAB (MathWorks). Aquest codi permetia sincronitzar i georeferenciar les dades obtingudes pel sensor i pel receptor GNSS, és a dir, associar una coordenada absoluta a cada lectura mitjançant una variable comuna de temps (Timestamp). També, eliminava la plataforma automotriu, visible al núvol 3D amb soroll (**Figura 12**) i calculava quina era la distància de cada punt respecte al terra, aconseguint una altura relativa de l'arbre. Per

fer aquest procés es disposava de dos arxius amb extensió *.m* i d'un arxiu *.xls* on s'havia d'especificar quina era la distància del sensor respecte a l'antena GNSS (offset Z), quina era la separació entre el sensor i el perfil metàl·lic de la plataforma automotriu (offset Y), a quina distància estava instal·lat el sensor respecte el terra i quina era la mida de la caixa que incloïa la plataforma i que es volia eliminar. En acabar aquest procés s'obtenia un arxiu *.txt* per a cada arxiu original que s'havia processat.

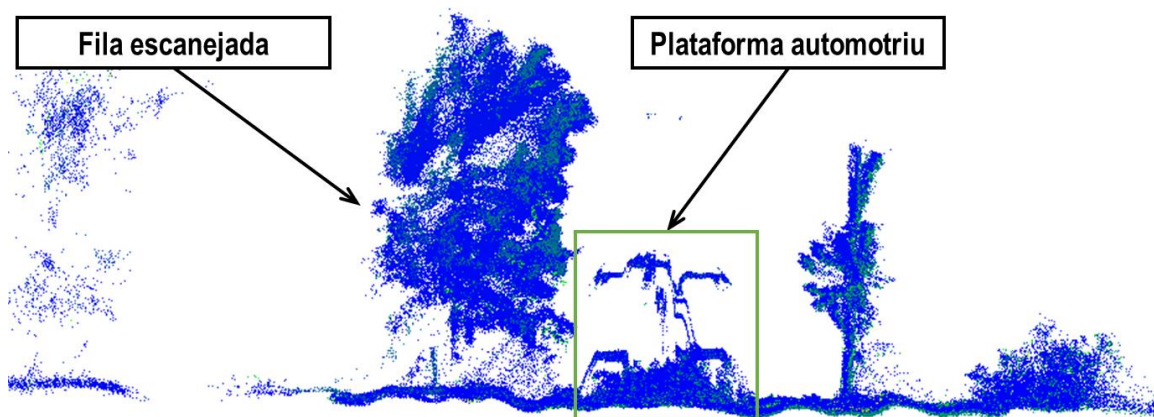


Figura 12. Representació de les dades captades pel sensor Velodyne Lidar VLP-16 (núvol de punts).

Per a dur a terme el maneig dels núvols de punts i facilitar el posterior càlcul d'amplades, alçades i seccions transversals de cada fila es va utilitzar el programari lliure CloudCompare (Daniel Girardeau-Montanut, París, França). En aquesta etapa es va procedir a compondre, mitjançant l'eina "*Merge multiple clouds*", un núvol de punts complet per a cada una de les files, és a dir, unir els escanejos adquirits des del centre del carrer esquerre i des del centre del carrer dret de la fila escanejada (**Figura 13**), identificant el número del carrer per conèixer, en tot moment, quin era l'origen dels punts. A més a més, era important identificar la correcta orientació de les files. Per fer-ho, s'havia d'observar que la forma de les branques dels ametllers obtingudes des dels dos carrers coincidissin en la majoria de les zones.

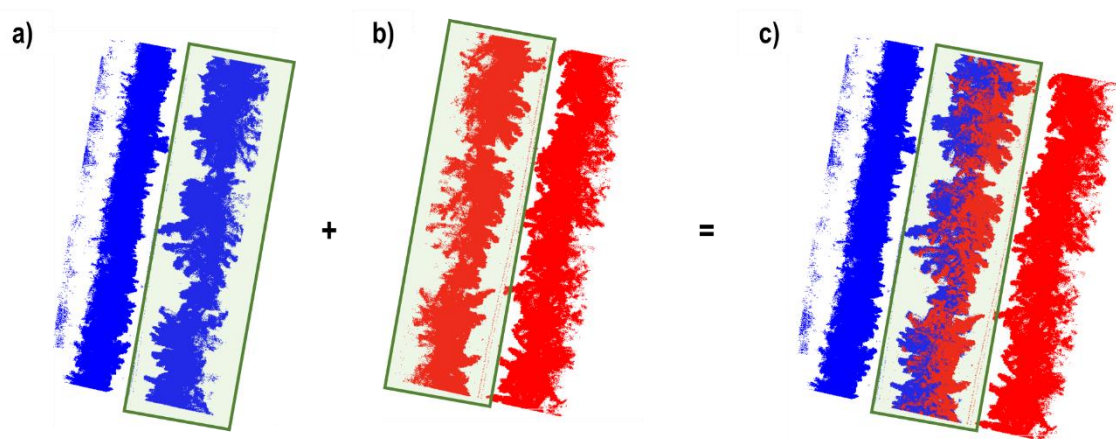
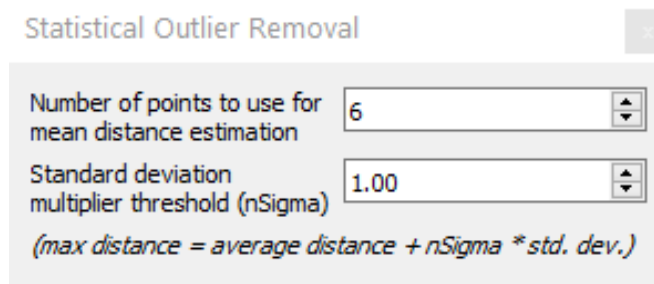


Figura 13. a) Escaneig des del centre del carrer esquerre de la fila 43; b) Escaneig des del centre del carrer dret de la fila 43; c) Composició completa del núvol de punts d'una fila 43.

A continuació, es van eliminar les files adjacents mitjançant l'eina "Segment", descartant, d'aquesta manera, zones que no aportaven informació a l'anàlisi. També es van retallar les files d'interès a la mateixa longitud per tal de facilitar la comparació dels resultats exposats a l'apartat 4 i determinar quines eren les condicions òptimes d'escaneig per al sensor Velodyne. Així doncs, totes les files es van retallar a una longitud de 87 metres.

Per als punts distants que es mantenien sobre les files escanejades o bé que estaven molt a prop de la vegetació i que era difícil d'eliminar-los de forma manual, es va decidir utilitzar una eina de neteja automàtica, anomenada "SOR (Statistical Outlier Removal)", on calia especificar el valor dels dos paràmetres (**Figura 14**):



Statistical Outlier Removal

Number of points to use for mean distance estimation: 6

Standard deviation multiplier threshold (nSigma): 1.00

(max distance = average distance + nSigma * std. dev.)

Figura 14. Expressió matemàtica del mètode de neteja automàtica SOR (Statistical Outlier Removal).

- **nPoints:** nombre de punts que es volien utilitzar per calcular la distància mitjana.
- **nSigma:** límit multiplicador de la desviació estàndard.

Per determinar quin era el valor dels paràmetres es van desenvolupar un conjunt de casos amb un tram de 15 metres de les files 43, 44 i 45 i s'observava quants punts s'eliminaven respecte al núvol original (**Taula 6, Figura 15**).

Taula 6. Diferents casos estudiats per determinar el valor nPoints i nSigma per al mètode SOR.

Cas	Nombre punts	Punts eliminats
a) Original	10.496.970	-
b) nSigma=2,50; nPunts=6	10.242.281	254.689
c) nSigma=2,50; nPunts=10	10.241.324	255.646
d) nSigma=3,00; nPunts=6	10.327.757	169.213
e) nSigma=3,00; nPunts=10	10.327.722	169.248

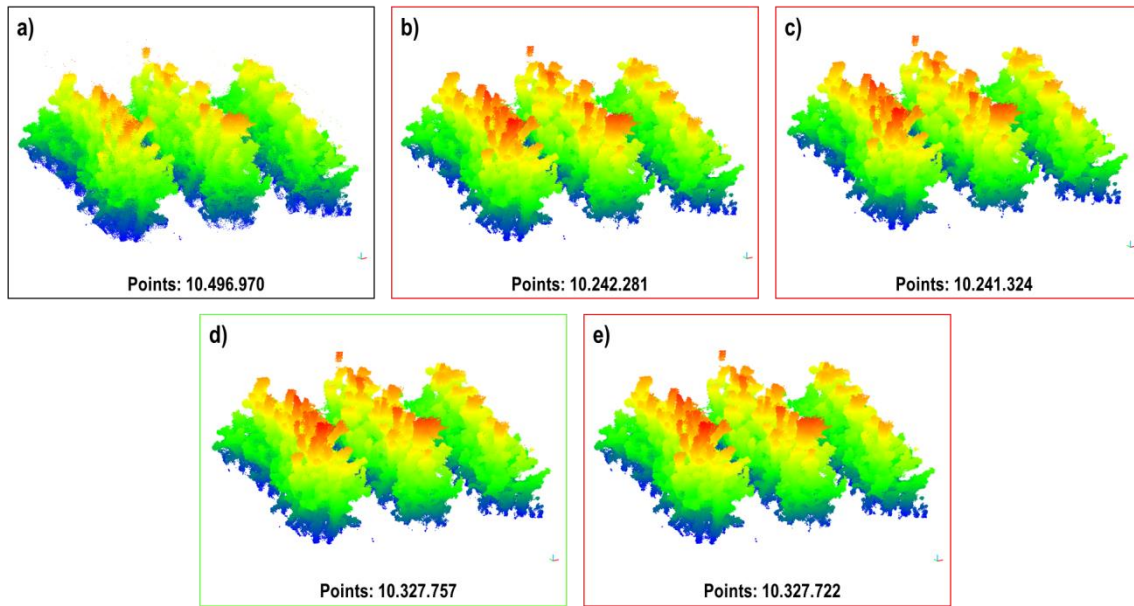


Figura 15. Representació dels trams de fila utilitzats per determinar els paràmetres del mètode SOR. **a)** Original; **b)** $n\text{Sigma}=2,50$; $n\text{Points}=6$; **c)** $n\text{Sigma}=2,50$; $n\text{Points}=10$; **d)** $n\text{Sigma}=3,00$; $n\text{Points}=6$; **e)** $n\text{Sigma}=3,00$; $n\text{Points}=10$.

Es va decidir utilitzar un valor $n\text{Points}=6$ i $n\text{Sigma}=3,00$, ja que d'aquesta forma només s'eliminaven els punts més allunyats i no s'alterava l'estructura dels ametllers.

Finalment, una vegada preparats els núvols de punts, es van generar 6 arxius de text ASCII per a cada fila (dues velocitats d'avanç i tres dates d'escaneig) amb una resolució de coordenades de tres decimals de coordenades de tres dígits i una resolució dels camps escalars (dades adjuntes) de dos decimals. Cada arxiu de text contenia les coordenades absolutes (X, Y, Z) en metres de cada punt i vuit camps escalars, exposats a continuació:

- a. **IR:** reflectància dels punts capturats. Valors de 0 a 100 per reflectivitats difuses mesurada pel sensor (Gené-mola et al. 2020).
- b. **Raig:** número de raig amb el qual es van capturar els punts.
- c. **Scan:** número d'escaneig o llesca a la qual pertanyien els punts.
- d. **Angle:** des de quin angle es van capturar els punts.
- e. **C2M (Cloud to Mesh):** alçada (en m) relativa dels punts respecte del terra.
- f. **Carrer:** carrer des del qual es va obtenir el núvol de punts. Per a cada fila es mostraven dos valors ja que l'escaneig es va fer des dels dos costats de la fila
- g. **Repetició:** en alguns casos no es va poder escanejar tota la fila de forma contínua. Hi havia algunes files que tenen més d'una repetició per compondre el núvol de punts.
- h. **Fila:** número de fila a la qual pertanyien els punts.

3.3.1. Codi d'anàlisi per al càlcul d'amplades, alçades i seccions

Una vegada preparats els núvols de punts, es va utilitzar un codi de càlcul desenvolupat amb la programació RStudio que utilitza el llenguatge de programació RScript. Aquest codi, explicat amb detall en aquest apartat, serveix per a calcular els paràmetres vegetatius que més interès generaven en aquest treball de caràcter experimental. El procés de càlcul és complex, ja que executa diversos processos matemàtics i requereix tenir coneixements de programació. És necessari destacar, que el codi que es va utilitzar era original del professor Jordi Llorens Calveras i que es va adaptar, constantment, als requisits que presentava el projecte. Així doncs, en aquest apartat es pretén explicar el funcionament del codi d'anàlisi desenvolupat.

Cal destacar, que en aquest treball no es disposa de dades de "veritat terreny" d'amplades, alçades i seccions i que, per tant, els resultats que s'han obtingut no es poden comparar amb els valors reals. Tanmateix, aquest fet no impedeix que els resultats que s'obtenen del càlcul matemàtic no es puguin comparar entre ells i, a partir d'aquí, que s'analitzi quins poden ser els resultats més fiables.

El codi d'anàlisi es pot dividir en dos grans blocs: el primer d'ells consisteix a establir els paràmetres de càlcul i en preparar les dades al format més adient; el segon, consisteix a calcular els paràmetres en qüestió. Abans de tot, però, cal ressaltar que per a garantir l'òptim funcionament del codi, calia descarregar i activar un conjunt de llibreries de R (packages), anomenades: "data.table", "splancs", "sp", "dplyr" i "alphahull".

▪ Primer bloc:

En aquesta primera part s'importaven dos arxius. El primer d'ells, en format .txt, contenia les dades de les files generades (núvol de punts), anteriorment, amb el software CloudCompare. El segon, en format .csv, aportava al programa les coordenades (X, Y) inicials i finals de l'anàlisi de cada fila (Taula 7), prèviament definides per l'usuari. Aquests dos arxius s'havien de trobar al mateix directori que el codi d'anàlisi per a poder ser llegits. Això, es va aconseguir implementant la funció "Get Working Directory".

Taula 7. Coordenades X, Y UTM 31T ETRS89 inicials i finals d'anàlisi de cada fila escanejada.

Fila	X inici (m)	Y inici (m)	X final (m)	Y final (m)
43	288320,350	4615832,255	288335,813	4615912,713
44	288323,464	4615831,700	288338,963	4615912,224
45	288326,696	4615831,140	288342,008	4615911,531

A més a més, també s'havia de definir quin era el caràcter de separació de les dades importades, quina era la separació dels nombres decimals i si l'arxiu que s'importava contenia encapçalament o no. Es van utilitzar dues funcions diferents, però que feien la mateixa tasca, segons els caràcter

de separació de les dades. Per a l'arxiu *.txt* es va utilitzar la funció “*fread*” i per a l'arxiu *.csv* “*read.csv*”.

- `fread(PathFile_ALL, sep = "\t", dec = ".", na.strings = "NA", header = T, fill = TRUE, data.table = FALSE)`
- `read.csv(PathFile_ALL2, header = TRUE, sep = ";", dec = ".")`

Seguidament, també calia indicar, entre altres, quina era la resolució longitudinal d'anàlisi que es volia utilitzar i amb quants feixos del sensor Velodyne es volia treballar. Aquestes dues variables es tractaran amb més detall als següents apartats.

El codi tenia habilitada una funció que permetia visualitzar un gràfic de les dades que s'estaven analitzant, juntament amb les coordenades escollides d'inici i final del càlcul matemàtic, respecte al sistema de coordenades UTM, datum geodèsic ETRS89 i zona 31T. Aquest fet, ajudava a identificar que la fila que s'estava analitzant fos la correcta (**Figura 16**). Tanmateix, donada la gran dimensió dels núvols amb què es treballava, es va decidir representar gràficament, únicament, el 5% de les dades de les quals es disposava.

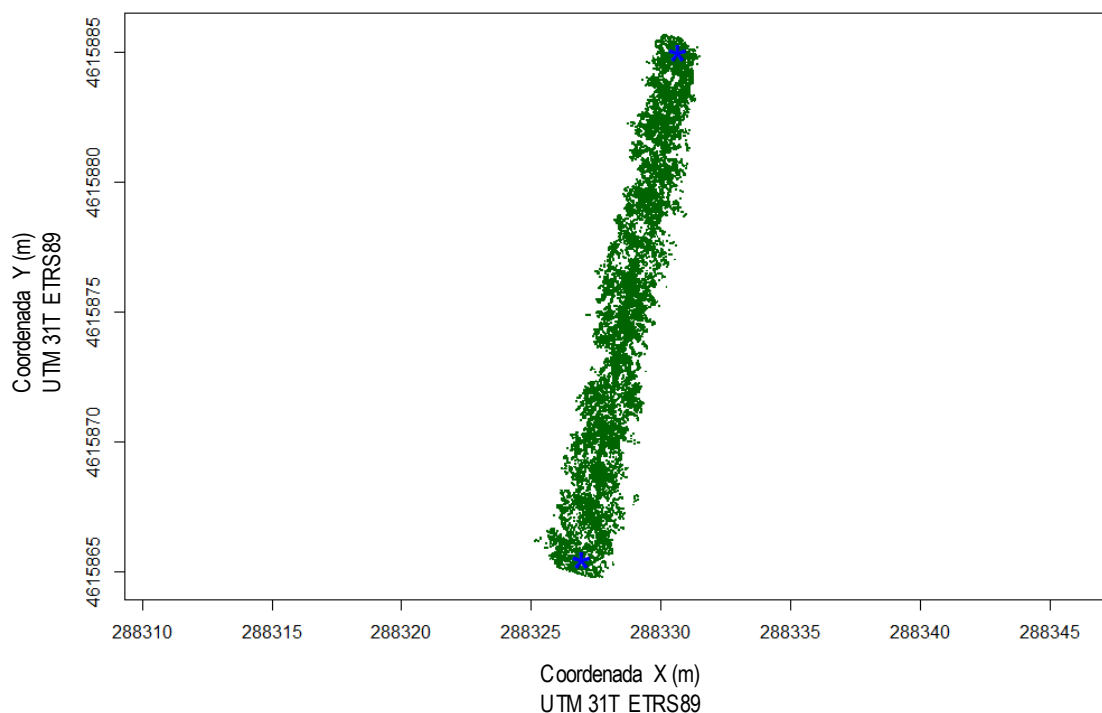


Figura 16. Representació d'un núvol de punts original projectat sobre el pla X-Y.

A continuació, es van reprojectar les dades sobre un nou el pla X-Y per tal d'agilitzar el procés de càlcul. Per fer-ho, es va habilitar una funció que permetia girar les files, on calia definir quina era la distància de cada dada respecte a l'origen de coordenades i l'angle α (alfa) respecte al pla horitzontal. Aquestes dades també es van representar en un gràfic per ajudar a entendre el funcionament de tot el procés matemàtic (**Figura 17**).

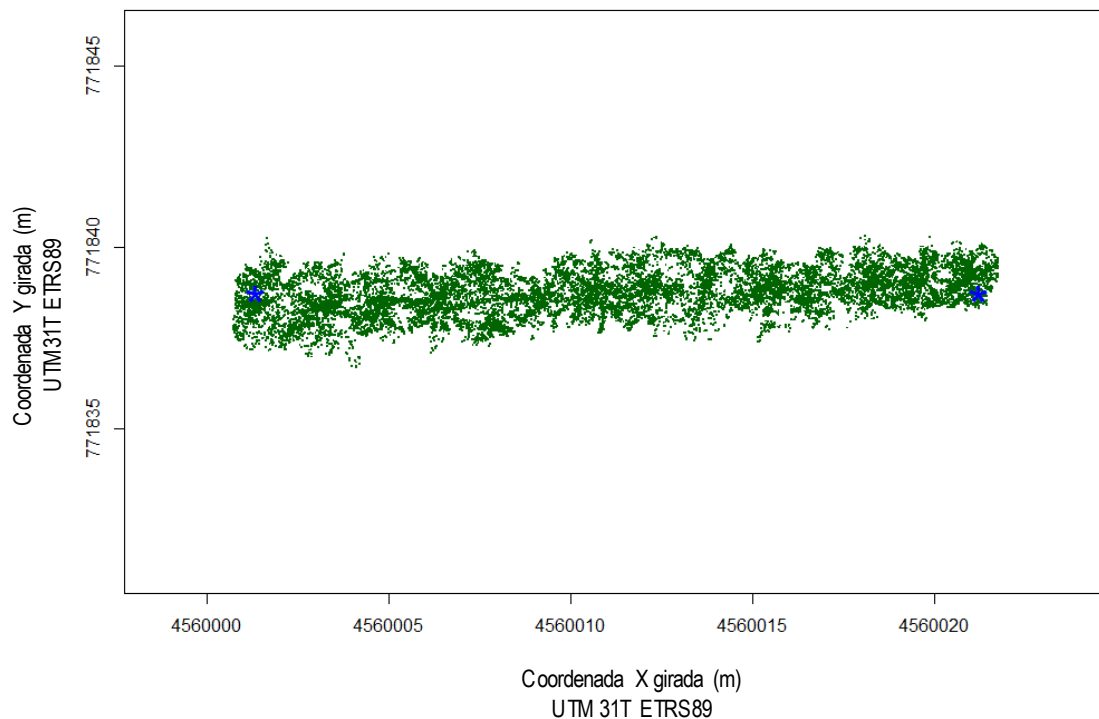


Figura 17. Representació d'un núvol de punts amb les coordenades girades sobre l'eix X.

▪ **Segon bloc:**

L'anàlisi es va dur a terme mitjançant la utilització d'unes caixes fictícies de forma prismàtica que recorrien la fila amb una direcció d'avanç en l'eix de les X (**Figura 19**). Aquestes tenien una amplada variable (Y), segons l'amplada de vegetació en aquell tram de la fila, 10 cm d'alçada en direcció de l'eix Z i 10 cm de profunditat amb direcció de l'eix X (**Figura 18**). La profunditat de la caixa d'anàlisi (coordenada X) acabava determinant quina era la resolució longitudinal de càlcul. Era important escollir una resolució d'anàlisi adequada per tal de poder calcular, de forma més acurada, els paràmetres vegetatius d'interès agronòmic, com són l'amplada, l'alçada i la secció transversal de les files escanejades.

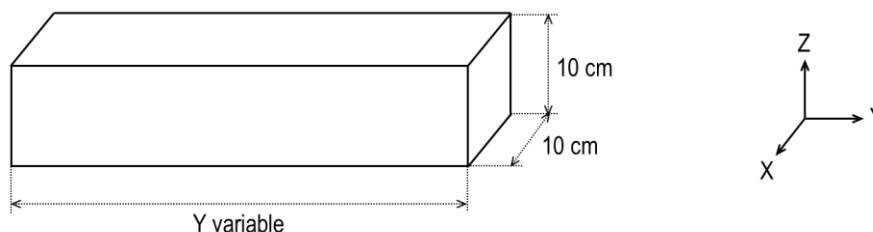


Figura 18. Representació gràfica d'un prisma d'anàlisi.

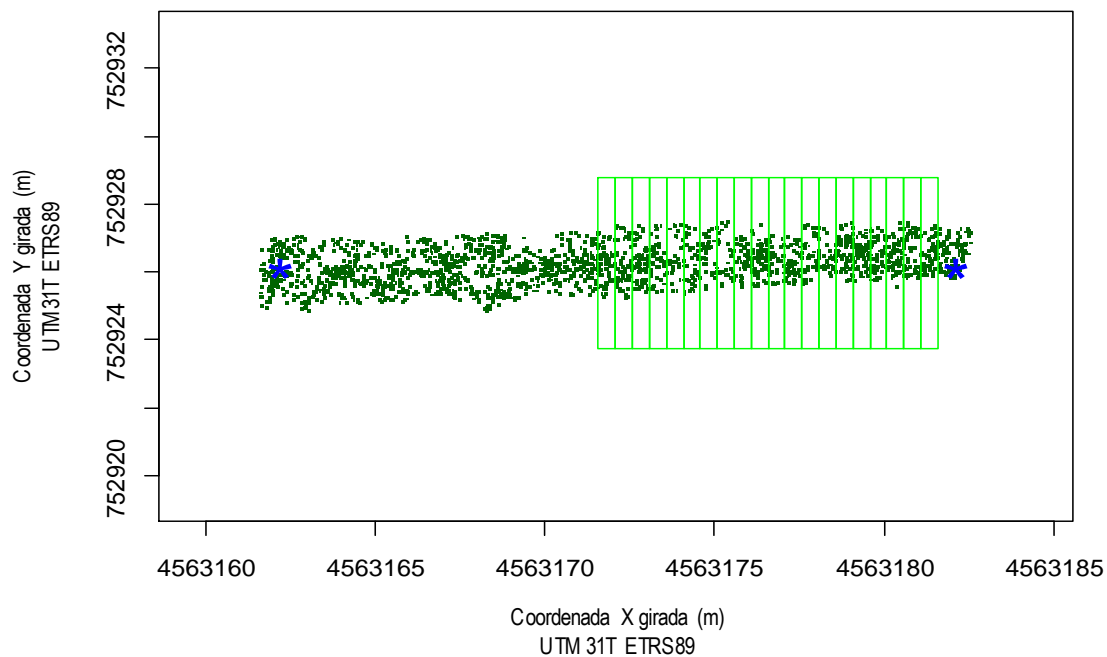


Figura 19. Representació gràfica de l'anàlisi d'una fila. De color blau els punts inicials i finals d'anàlisi i de color verd les llesques d'escaneig.

Pel que fa a l'amplada de la caixa d'anàlisi, variable en l'eix de les Y, es va decidir calcular-la de dues maneres diferents:

- Amplada Màxima:** distància compresa entre els dos punts més allunyats continguts a l'interior de cada prisma.
- Amplada Percentil 95:** dins de cada prisma les dades segueixen una distribució normal. Es va calcular el percentil 2,5 % i el percentil 97,5 % i se'n va fer la diferència per a obtenir l'amplada.

Durant el funcionament del codi d'anàlisi, es construïen tants prismes (en l'eix Y i Z) com eren necessaris per a aconseguir una caracterització total de la vegetació. El centroid de cada prisma havia de coincidir, el màxim possible, amb el centre de la fila analitzada en l'eix Y. Tanmateix, cal destacar la dificultat d'aconseguir-ho perquè, com és evident, existia una certa sensibilitat en què, en algun punt, la fila estigués moguda al costat dret o esquerre. L'acumulació de prismes en l'eix Z de la fila analitzada i amb una profunditat de 10 cm (resolució longitudinal escollida) defineix el concepte de "llesca". Per a cada una de les llesques es determinava, tal com es feia amb l'amplada, l'alçada màxima i l'alçada percentil 95.

Per a cada llesca, també es calculava la secció transversal (en m²), corresponent a la projecció de tots els punts en un pla Y-Z. Inicialment es feia mitjançant tres mètodes de càlcul tradicionals, anomenats Convex Hull, Secció amplada Màxima i Secció amplada Percentil 95. El primer d'ells, calculava la secció mitjançant l'algoritme *Convex Hull* (chull, Becker, R. A., Chambers, J. M. and Wilks, A. R. (1988). *The New S Language*. Wadsworth & Brooks/Cole), el qual creava una polilínia

amb costats convexos entre els punts més extrems de cada caixa d'anàlisi. El segon, calculava la secció transversal acumulant tots els punts continguts als prismes calculats amb l'amplada màxima definida en direcció de l'eix Y. El tercer, i últim, la calculava igual que l'anterior però tenint en compte una amplada variable dels prismes en funció del percentil 95% (**Figura 20**).

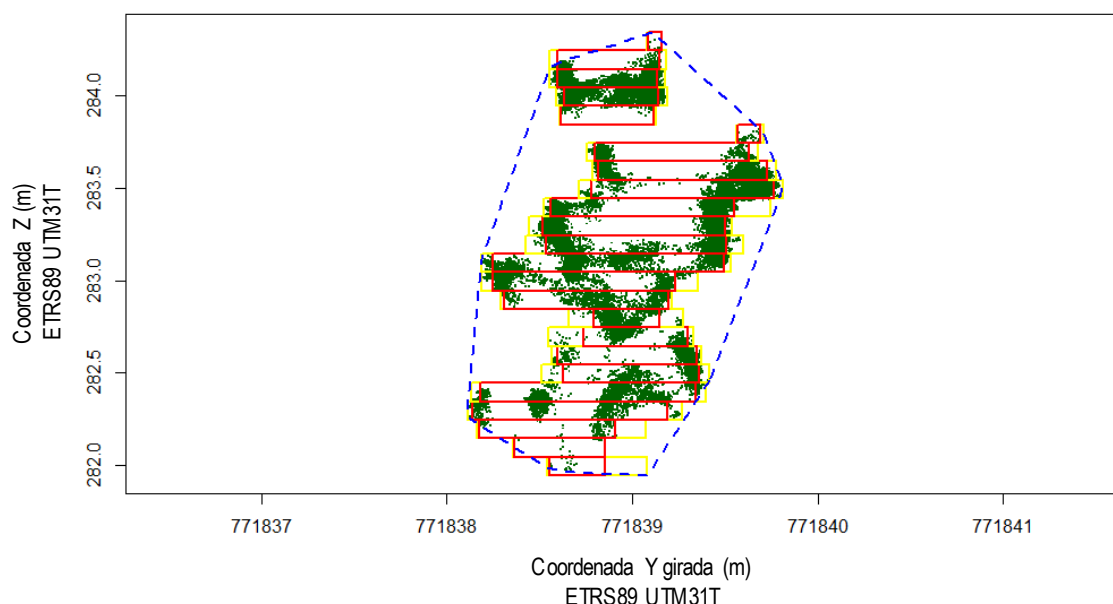


Figura 20. Secció transversal en un punt de la fila analitzada. La línia blava correspon al càlcul de la secció mitjançant el mètode **ConvexHull**. L'acumulació de prismes de color groc fan referència a la secció transversal calculada amb l'amplada màxima. L'acumulació de prismes de color vermell fan referència a la secció transversal calculada amb l'amplada percentil 95 %.

Donat que els mètodes de càlcul anomenats tradicionals (perquè s'havien estat aplicant fins al moment) calculaven com a secció transversal moltes zones de les llesques on no hi havia punts i que, per tant, es va suposar que no hi havia vegetació, es va decidir canviar la metodologia de càlcul, i en conseqüència fer una modificació del codi original i implementar-hi dos nous mètodes que permetrien aconseguir uns resultats més curosos i ajustats a la realitat. Aquests es van anomenar Retícula i Alpha Convex Hull juntament amb el valor d'ajustament (descriu més avall). Cal destacar que per tal de garantir d'agilitzar el funcionament d'aquests dos mètodes es van haver de crear dos codis secundaris (en format "function" en programació R) que permetien tenir disponibles i utilitzar les funcions matemàtiques quan es necessitaven.

Per una banda, el mètode Retícula (cel·les) creava i ajustava tantes superfícies rectangulars en cada secció transversal com fossin necessàries per caracteritzar les zones on hi havia presència de punts, excloent, les zones on no n'hi havia (**Figura 21**). És necessari destacar que va caldre definir quina era la mida de la cel·la amb què es volia treballar. En aquest treball, es van utilitzar els valors de 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5, expressat en metres.

Per altra banda, el mètode Alpha Convex Hull, similar al mètode Convex Hull, ajustava una polilínia de vèrtex convexos entre els punts més externs de la vegetació. En aquest cas, però, es disposava del paràmetre " α ", el qual permetia ajustar la polilínia segons es desitjava. Tal com es mostra a la **Figura 22**, amb valors elevat d'alfa s'aconseguia un ajust més groller i amb valors baixos un ajust més precís. Per aquest mètode, també es van utilitzar els valors d' α 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 i 0,5.

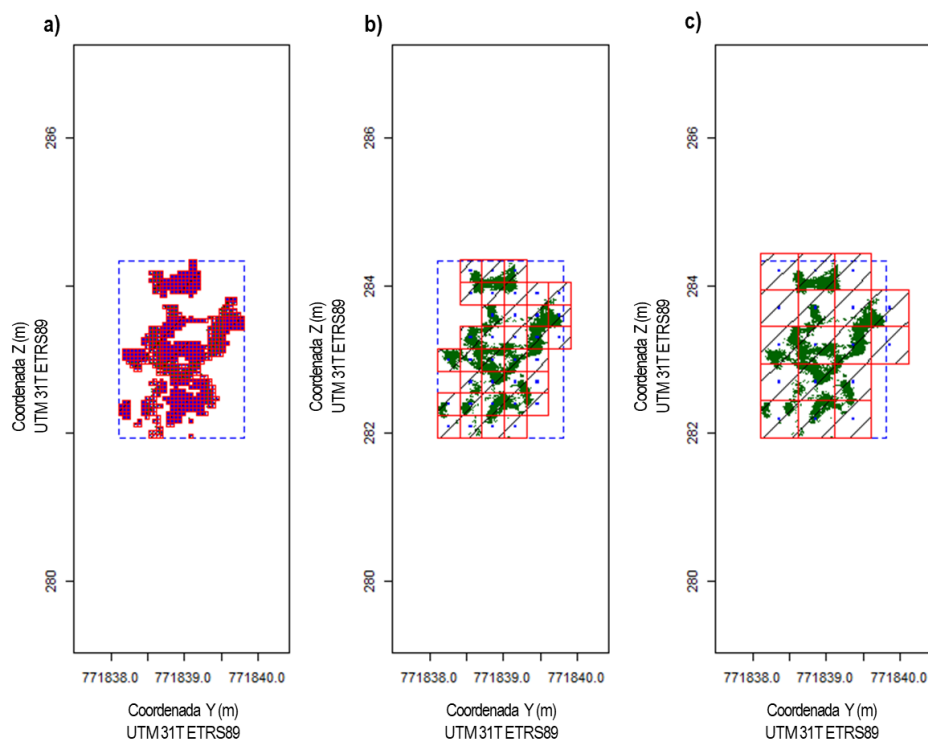


Figura 21. Representació gràfica del mètode Retícula amb diferents mides de cel·la: **a)** 0,05 m; **b)** 0,3 m; **c)** 0,5 m.

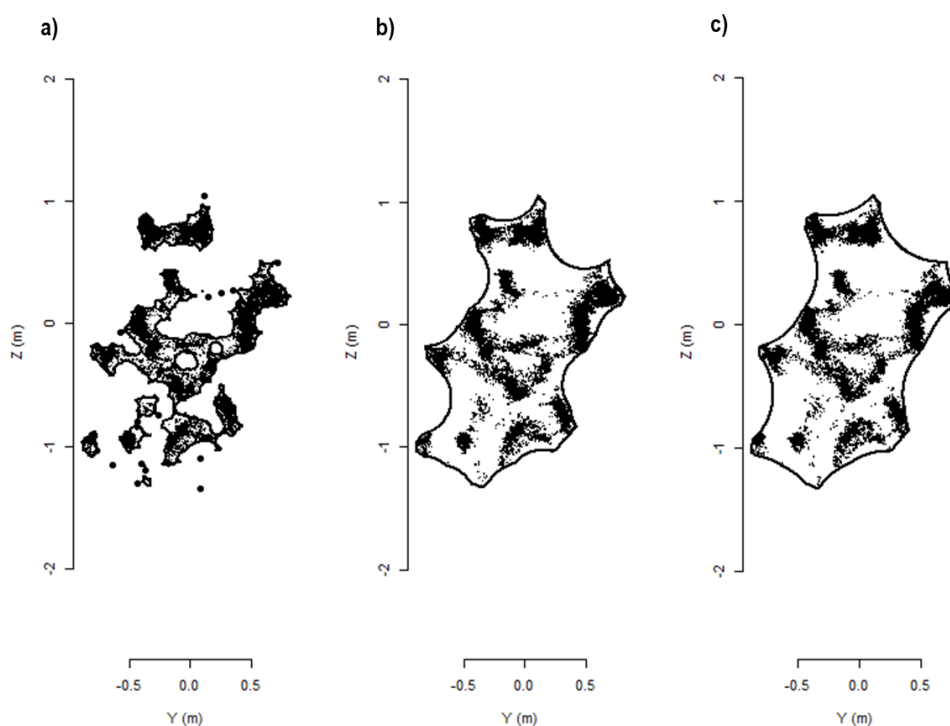


Figura 22. Representació gràfica del mètode *Alpha Convex Hull* amb diferents valors d'alfa (α). **a)** 0,05; **b)** 0,3; **c)** 0,5.

Tant per un mètode com per l'altre, amb mides petites de la cel·la i amb valors petits d' α , s'evitava comptabilitzar les zones sense punts de les seccions, considerant que els resultats obtinguts estaven més ajustats a la realitat.

Un cop el codi acabava d'analitzar les files s'obtenien dos arxius *.txt*. El primer d'ells, anomenat "DataExport", estava format per 16 columnes i tantes files com prismes construïts al llarg de l'eix X. La informació que contenia era la següent:

- **X:** centre del prisma d'anàlisi respecte a la coordenada X.
- **Y:** centre del prisma d'anàlisi respecte a la coordenada Y.
- **Fila:** nombre d'identificació de la fila que s'havia analitzat.
- **Caixa:** identificació de les caixes d'anàlisi construïdes en direcció de l'eix X.
- **AmpleMàx:** amplada màxima de cada caixa d'anàlisi en direcció de l'eix Y.
- **Ample95:** amplada al percentil 95 de cada caixa d'anàlisi en direcció de l'eix Y.
- **DVAmpleMàx:** desviació estàndard de l'amplada màxima per a cada caixa d'anàlisi.
- **DVAmple95:** desviació estàndard de l'amplada al percentil 95 per a cada caixa d'anàlisi.
- **AltMàx:** alçada màxima en direcció de l'eix Z de cada una de les llesques.
- **Alt95:** alçada al percentil 95 en direcció de l'eix Z de cada una de les llesques.
- **Mín_R:** Angle mínim del sensor Velodyne amb el que s'havia fet l'anàlisi del núvol de punts. La majoria de les vegades tenia un valor negatiu.
- **Màx_R:** Angle màxim del sensor Velodyne amb el que s'havia fet l'anàlisi del núvol de punts. La majoria de les vegades tenia un valor positiu.

El segon arxiu, anomenat "DataSecció", contenia tots els resultats referents als diferents mètodes de càlcul emprats, ja descrits anteriorment. Estava format per 6 columnes i tantes files com caixes construïdes en direcció de l'eix X i com combinacions de feixos realitzades. Aquest arxiu estava dissenyat per obtenir les dades amb una estructura idònia per ser utilitzat, directament, pel programa de tractament estadístic de les dades.

- **Mètode:** Identificació del mètode de càlcul de la secció transversal utilitzat (*Convex Hull*, amplada màxima, amplada percentil 95, Retícula i *Alpha Convex Hull*).
- **Resolució:** Identificació de la mida de la retícula utilitzada o bé del valor " α " emprat.
- **Secció:** Secció transversal obtinguda per a cada caixa d'anàlisi.
- **Caixa:** Identificació de les caixes d'anàlisi construïdes en direcció de l'eix X.
- **Mín_R:** Angle mínim del sensor Velodyne amb el que s'havia fet l'anàlisi del núvol de punts. La majoria de les vegades tenia un valor negatiu.
- **Màx_R:** Angle màxim del sensor Velodyne amb el que s'havia fet l'anàlisi del núvol de punts. La majoria de les vegades tenia un valor positiu.

3.3.2. Velocitat òptima d'avanç del sistema d'escaneig

Per les tres dates d'escaneig, el sistema MTLS avançava a dues velocitats diferents entre les fileres d'ametllers del camp d'assaig. La primera, identificada com a v_0 , corresponia a una velocitat d'avanç lenta, d' $1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. La segona, anomenada v_2 , era al doble de la inicial i era de $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Taula 8). Si bé és cert que aquestes dues velocitats permetien obtenir una caracterització completa de la vegetació, des del punt de vista d'un agricultor, podrien semblar lentes comparat amb altres tasques de camp que es duen a terme en una plantació de fruita seca. Així doncs, en aquest apartat, s'ha proposat un mètode de càlcul que permet simular quins resultats s'haurien obtingut per una quarta velocitat d'avanç, anomenada v_4 i propera a $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Taula 8. Velocitats teòriques d'avanç expressades en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Velocitat teòrica	Velocitat d'avanç ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
v_0	1,00
v_2	2,00
v_4	4,00

Tal com s'ha explicat en apartats anteriors, el codi d'anàlisi construïa tantes "llesques" com eren necessàries en direcció de l'eix X, en funció de la resolució longitudinal. La idea principal del mètode es recolzava en eliminar, de forma intermitent, algunes d'aquestes llesques i simular, així, el nombre de punts que s'haurien obtingut a velocitats d'avanç més elevades.

Per aconseguir-ho va caldre fer una modificació del codi i habilitar la següent funció, només quan es volien simular velocitats diferents de les que s'havien utilitzat a camp:

- **ConservaUnaCada** → En aquesta variable calia indicar quantes llesques es volien conservar. Per a simular v_4 , corresponent a $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, de cada 4 llesques se n'eliminaven 3 i se'n conservava una.

En primer lloc, el mètode individualitzava la composició del núvol de punts (dreta i esquerra) de la filera. Seguidament, per a cada un d'aquests núvols s'eliminaven les llesques amb la freqüència que s'indicava a la funció. Finalment, es tornaven a muntar els núvols i s'obtenia una composició amb un menor nombre de punts. Aquest procés, ajudava a simular la quantitat de punts que s'haurien obtingut amb una velocitat d'avanç de $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Com és lògic, el fet d'avançar a velocitats superiors suposava que el núvol estigués format per un menor nombre de punts, afectant, d'aquesta manera, al càlcul dels paràmetres vegetatius d'interès exposats en aquest treball.

3.3.3. Combinació òptima de feixos del sensor

El sensor Velodyne VLP-16 funcionava amb 16 feixos de llum infraroja que estaven associats a un angle d'incidència diferent, els quals oscil·laven entre -15° i $+15^\circ$. Cada dada emmagatzemada tenia identificada el feix de llum del qual s'havia originat el retorn. Disposant d'aquesta informació, es va crear una funció al codi d'anàlisi que ajudava a calcular els paràmetres vegetatius d'interès amb diferents combinacions de feixos segons els requisits que es plantegessin.

A causa dels requisits computacionals que requereix el programa, únicament es va emprar aquesta eina per un tram de 20 metres del núvol de punts corresponent a la fila 43 escanejada el 13/07/2018. Es van plantejar 17 anàlisis amb diferents combinacions de feixos, tal com es mostra a la **Taula 9**, on es calculaven les amplades, alçades i seccions transversals amb els mètodes de càlcul exposats a l'apartat 3.3.1. Des de l'anàlisi 1.1 a l'anàlisi 9, només es tenien en compte les parelles d'angles seleccionades (Rang Angles \rightarrow NO). En canvi, des de l'anàlisi 10 al l'anàlisi 16, també es van tenir en compte els angles compresos entre les parelles d'angles seleccionades (Rang Angles \rightarrow SI).

Taula 9. Identificació dels anàlisis realitzats segons les combinacions de feixos del sensor Velodyne VLP-16. De color blau variable RangAngles \rightarrow NO i de color groc RangAngles \rightarrow SI.

Feixos làser																
Canal	15	13	11	9	7	5	3	1	14	12	10	8	6	4	2	0
Angle	15	13	11	9	7	5	3	1	-1	-3	-5	-7	-9	-11	-13	-15
Anàlisi 1.1								x								
Anàlisi 1.2									x							
Anàlisi 2								x	x							
Anàlisi 3							x			x						
Anàlisi 4						x					x					
Anàlisi 5					x							x				
Anàlisi 6				x									x			
Anàlisi 7			x											x		
Anàlisi 8		x													x	
Anàlisi 9	x															x
Anàlisi 10							x	x	x	x						
Anàlisi 11						x	x	x	x	x	x					
Anàlisi 12					x	x	x	x	x	x	x	x				
Anàlisi 13				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
Anàlisi 14			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Anàlisi 15		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Anàlisi 16	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Un cop s'havia decidit en quina fila es volia fer l'anàlisi, calia ajustar les següents variables de la funció per aconseguir els resultats:

- **ChannelStart** → $c(-1, -3, -5, \dots, n)$
En aquesta variable s'havia d'indicar en quin angle negatiu (de -1° a -15°) o bé en quin feix començava l'anàlisi. El programa permetia introduir una seqüència d'angles, de manera que es feien tantes anàlisis com angles indicats.
- **ChannelEnd** → $c(1, 3, 5, \dots, n)$
En aquesta variable s'havia d'indicar en quin angle negatiu (de 1° a 15°) o bé en quin feix acabava l'anàlisi. El programa permetia introduir una seqüència d'angles, de manera que es feien tantes anàlisis com angles indicats.
- **RaigenGraus** → SÍ/NO
Calia indicar amb un **SI** si els nombres que s'havien introduït a les variables ChannelStart i ChannelEnd corresponien als angles o amb un **NO** si corresponien als feixos del sensor.
- **RangAngles** → SÍ/NO
Calia indicar amb un **NO** si es volia que el codi no tingués en compte els angles intermitjos que es troben entre els que s'indicaven a les variables *ChannelStart* i *ChannelEnd* (representat de color blau a la **Taula 9**). Per contra, calia indicar un **SI** si es volia que el codi tingués en compte els angles intermitjos que es troben entre els angles que s'indicaven a les variables *ChannelStart* i *ChannelEnd*.

3.4. Tractament estadístic de les dades

Un cop analitzats els diferents núvols de punts amb el codi adaptat per aquest treball experimental, es va procedir a fer una anàlisi estadística, mitjançant un codi desenvolupat amb R i el software JMP Pro 13.0, dels resultats obtinguts. L'objectiu era establir els paràmetres òptims d'escaneig per al sensor Velodyne VLP-16 per a calcular alçades, amplades i seccions transversals d'ametllers.

Per a aconseguir els objectius proposats en aquest projecte es va determinar una seqüència de treball. En primer lloc, es va establir la combinació de feixos òptima per al càlcul dels paràmetres vegetatius d'interès. Per fer-ho es van utilitzar les 17 combinacions de feixos que es mostren a l'apartat 3.3.3 pels paràmetres d'amplada màxima, alçada màxima i secció transversal calculada amb els mètodes tradicionals i amb els nous mètodes de càlcul proposats (apartat 3.3.1). A causa de la gran quantitat de combinacions possibles es va decidir representar en diversos gràfics de línies els resultats obtinguts d'un tram de 10 m de la fila 43 i fer-ne una comparativa visual. Cal destacar que el gràfic de línies permet observar l'evolució dels paràmetres estudiats per les diferents combinacions de feixos al llarg del tram de filera i copsar zones d'interès com poden ser forats i sortints de vegetació.

En aquest cas, es va utilitzar el codi desenvolupat amb Rstudio, el qual comprovava els supòsits de normalitat i d'homoscedasticitat i feia una separació de mitjanes (prova HSD de Tukey) dels resultats escollint de forma aleatòria el nombre de mostres (en funció de la variabilitat) i les llesques amb que es duia a terme l'anàlisi estadística. Per aconseguir-ho, es va utilitzar la funció Power Calculation, establint un nivell de significació de 0,05 i una potència de 0,9. També va ser necessari habilitar les llibreries d'R (packages) anomenades *mixlm* i *MASS*.

- **Model utilitzat:**

```
lm.1<-lm(R~Tests+r(Step),data=DATA2) # model. Identifiquem el factor Random (r)
Anova(lm.1,type="III")
```

- **Funció per a dur a terme la separació de mitjanes:**

```
AA<-HSD.test(lm.1, "Tests", group=TRUE,alpha=0.05,console = FALSE)
AA$groups
```

Una vegada escollida la millor combinació de feixos es va procedir a identificar, mitjançant el tram de 10 m de fila, el mètode de càlcul que permetia obtenir valors de secció de fila el més versemblant possible. En aquest cas, es va utilitzar el *software* JMP i es va dur a terme una anàlisi estadística dos factors, ajustant les dades a un model lineal. Es tenia en compte, per una banda, l'efecte de les combinacions de feixos escollides i dels mètodes de càlcul utilitzats i per altra banda, l'efecte de la interacció entre aquests dos factors.

Seguidament, es va dur a terme una tercera anàlisi estadística per tal d'escollir la velocitat d'avanç del sistema MTLS. En aquest cas, les dades que es van utilitzar van ser les que es van obtenir de l'anàlisi del tram de 10 m de la fila 43 per a dues combinacions de feixos extremes: -15° a $+15^\circ$ amb rang d'angles i -1° i $+1^\circ$. Aquesta anàlisi també es va dur a terme mitjançant el programa JMP, on es tenia en compte l'efecte d'aquests dos factors.

Finalment, una vegada identificats els paràmetres òptims d'escaneig, es va procedir a comparar amb el programa JMP els resultats dels paràmetres vegetatius que s'havien obtingut de l'anàlisi de les files completes (87 m). Per a cada fila i per a cada data d'escaneig (13/06/2018, 13/07/2018 i 01/08/2018) es van comparar les alçades màximes, les amplades màximes i les seccions transversals de capçada per tal de detectar canvis significatius de vegetació.

3.5. Avaluació econòmica

En el moment d'emprendre un nou negoci cal tenir en compte la inversió inicial a la qual s'ha de fer front per poder oferir un nou servei. És per aquest motiu que cal fer una previsió a mig termini del volum de negoci i una avaluació econòmica per a calcular l'amortització i la rendibilitat de l'equipament comprat. En aquest treball s'ha calculat quantes hectàrees hauria d'escanejar i processar anualment una empresa de serveis a tercers (donat un preu de servei per hectàrea) per amortitzar l'equipament tecnològic comprat en un termini màxim de 5 anys, per tal de que el material adquirit no quedi obsolet.

Es va utilitzar un full de càlcul per calcular els diferents paràmetres financers i determinar quantes hectàrees s'han d'escanejar en un any donat un cost per hectàrea típic d'algunes tasques de camp que es duen a terme en una explotació fructícola.

$$VAN = -K_0 + \sum \frac{FC}{(1+r)^t}$$

on K_0 =pagament de la inversió
 T =vida de la inversió
 FC =flux de caixa
 r =interès

En primer lloc, es va tenir en compte la inversió inicial realitzada. En aquesta s'hi va incloure la compra del material tecnològic necessari per dur a terme l'escaneig com és el sensor LiDAR Velodyne VLP-16, el sistema de georeferenciació, el sistema d'emmagatzematge de les dades i materials diversos com suports i cables del sistema. En segon lloc, també es van contemplar les despeses, destacant principalment el servei tècnic. Disposar d'un conjunt de dades i no saber-les interpretar no aporta coneixement nou sobre la parcel·la escanejada, així doncs, el servei tècnic és el component necessari per a processar les dades i fer un assessorament acurat les plantacions escanejades.

Finalment, per a calcular les despeses, es va tenir en compte el temps que es tardaria a escanejar 1 ha d'ametllers passant per tots el carrers. Aquest fet depèn de la velocitat òptima d'avanç del sistema, exposada en l'apartat corresponent. També es va tenir en compte que el marc de plantació dels ametllers en una finca superintensiva és d'1,5 m entre arbres i de 3,2 m entre fileres.

3.6. Programari utilitzat

La **Figura 23** mostra la seqüència de programes que s'ha utilitzat durant el desenvolupament d'aquest treball:

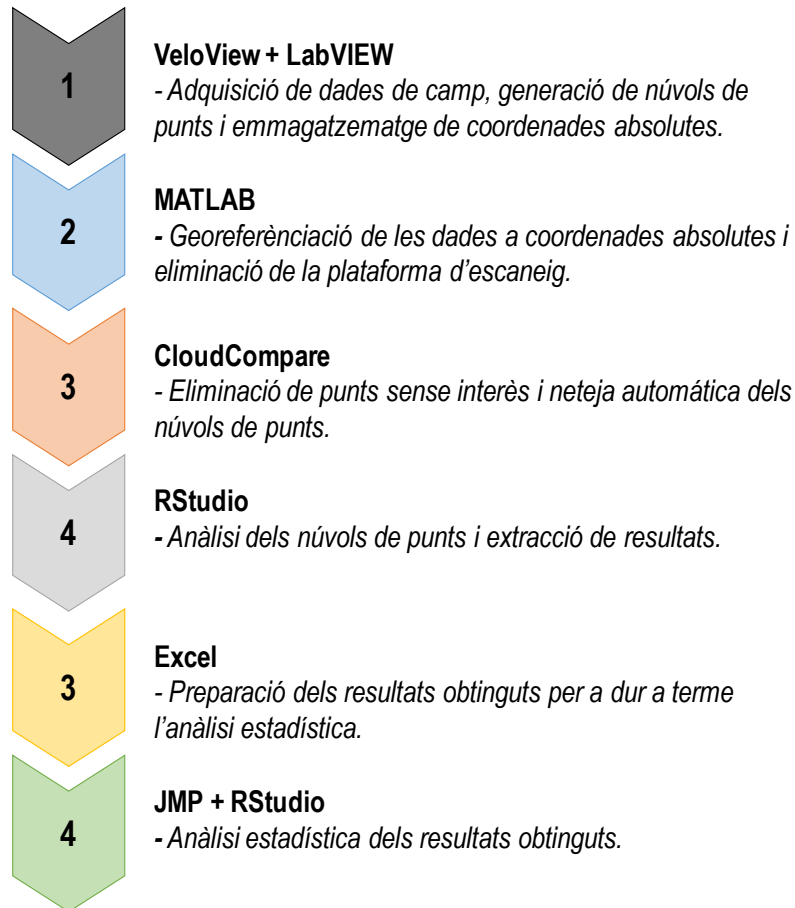


Figura 23. Seqüència de programes utilitzats.

4. Resultats

4.1. Combinació òptima de feixos

En aquest apartat es presenten els resultats estadístics obtinguts de l'anàlisi d'un tram de 10 metres de la fila 43 escanejada el 13/06/2018 segons les combinacions de feixos que es mostren a la **Taula 9** de l'apartat 3.3.3. S'han examinat els paràmetres vegetatius d'amplada màxima, alçada màxima i secció transversal amb els diferents mètodes de càlcul proposats, ja que aquests són els més representatius a l'hora de definir l'estructura del cultiu i el vigor de la vegetació. Cal destacar, també, que totes les dades que es representen en aquest apartat segueixen una distribució normal i que les mostres comparades són homoscedàstiques.

4.1.1. Resultats per paràmetres agronòmics estudiats

4.1.1.1. Amplada de capçada

A la **Figura 24** es representen les amplades màximes de capçada de la fila esmentada segons les combinacions de feixos estudiades. S'han tingut en compte, per una banda, els resultats obtinguts de l'anàlisi de les parelles d'angles sense els angles compresos entre elles (anomenat com a "sense rang") i, per altra banda, els resultats de l'anàlisi de les parelles d'angles amb els angles compresos entre elles (anomenat com a "amb rang"). A més a més, a la **Taula 10**, es mostren les *llesques* utilitzades per a fer l'anàlisi estadística i a la **Taula 11** la comparació de les mitjanes d'amplada màxima del tram de fila d'ametllers estudiat.

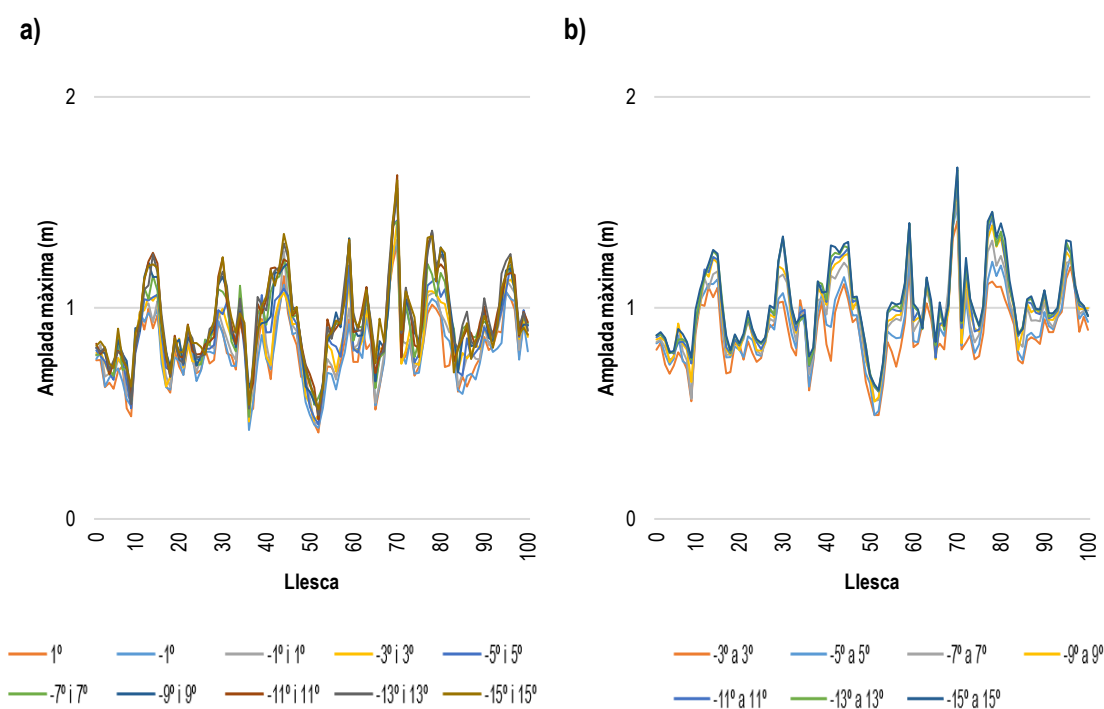


Figura 24. Representació gràfica de l'amplada màxima de capçada per parelles d'angles. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

Taula 10. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de l'amplada màxima mitjana.

Nombre de llesques	10
Identificació llesques	6; 45; 44; 63; 22; 26; 66; 90; 37; 53

Taula 11. Separació de mitjanes d'amplada màxima mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Amplada Màxima Mitjana (m)	
-15 a 15 (Amb Rang)	1,018 a
-13 a 13 (Amb Rang)	0,999 a
-11 a 11 (Amb Rang)	0,983 a
-9 a 9 (Amb Rang)	0,982 a
-7 a 7 (Amb Rang)	0,967 a
-15 i 15 (Sense Rang)	0,956 a
-13 i 13 (Sense Rang)	0,929 a
-5 a 5 (Amb Rang)	0,923 a
-9 i 9 (Sense Rang)	0,919 a
-11 i 11 (Sense Rang)	0,916 a
-7 i 7 (Sense Rang)	0,905 a
-3 a 3 (Amb Rang)	0,883 a
-5 i 5 (Sense Rang)	0,875 a
-3 i 3 (Sense Rang)	0,852 a
-1 i 1 (Sense Rang)	0,851 a
-1 i -1 (Sense Rang)	0,798 a
1 i 1 (Sense Rang)	0,786 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

Les combinacions de feixos del sensor LiDAR Velodyne VLP-16 estudiades en aquest treball no presenten diferències significatives entre elles pel que fa al paràmetre d'estudi amplada màxima, tot i haver-hi una diferència d'aproximadament un 25% entre el primer i l'últim valor d'amplada de vegetació que es mostra a la **Taula 11**.

S'observa que la majoria de les anàlisis dutes a terme amb les combinacions que incorporen els angles compresos entre les parelles estudiades se situen a la part superior de la taula, detectant una disminució de l'amplada mitjana a mesura que el rang d'angles disminueix, a causa de la disposició dels feixos de llum del sensor, tal com es mostra a la **Figura 5**. En qualsevol cas, hi ha un augment de l'amplada màxima quan, per una mateixa parella d'angles, es tenen en compte els angles compresos en aquesta (Amb rang), detectable a la **Figura 24**.

Tanmateix, totes les combinacions permeten observar entrants i sortints de vegetació, els quals tenen un alt interès agronòmic per a dur a terme tractaments diferencials.

4.1.1.2. Alçada de capçada

A la **Figura 25** es representen les alçades màximes de capçada de la fila segons les combinacions de feixos estudiades. A la **Taula 12**, es mostren les *llesques* utilitzades per a fer l'anàlisi estadística i a la **Taula 13** la comparació de les mitjanes d'alçada màxima del tram de fila d'ametllers estudiat.

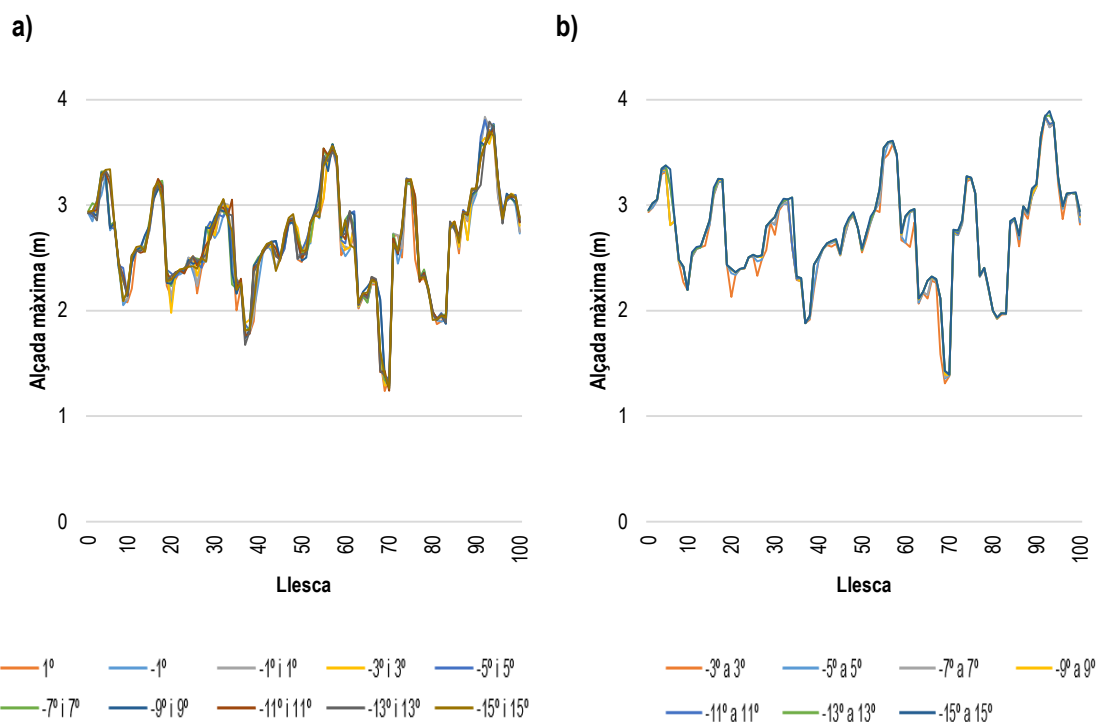


Figura 25. Representació gràfica de l'alçada màxima de capçada per parelles d'angles. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

Aparentment (**Figura 25**), el sensor LiDAR utilitzat en aquest treball no perd sensibilitat per a calcular l'alçada màxima de capçada quan s'utilitzen un nombre menor de feixos de llum, és a dir, des dels feixos centrals als feixos més oblics. Als 2 metres del tram de fila estudiat s'aprecia que tant per a la combinació d'angles -3° i $+3^\circ$ (sense rang d'angles) com per a la combinació -3° a $+3^\circ$ (amb rang d'angles) hi ha una petita pèrdua d'informació. Tanmateix, per a la resta de combinacions la representació gràfica mostra com les línies se superposen, inclús, els valors obtinguts són pràcticament idèntics entre "Sense rang d'angles" i "Amb rang d'angles".

L'explicació anterior queda reforçada amb la **Taula 13**, on s'observa que no existeixen diferències significatives entre les diferents combinacions de feixos estudiades. A més a més, tan sols s'aprecia una diferència de 0,161 m entre el primer i el darrer valor. Així doncs, qualsevol d'aquestes combinacions poden ser útils per calcular, de forma precisa, l'alçada màxima de capçada.

Taula 12. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de l'alçada màxima mitjana.

Nombre de llesques	10
Identificació llesques	6; 45; 44; 63; 22; 26; 66; 90; 37; 53

Taula 13. Separació de mitjanes d'alçada màxima mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles..

Alçada Màxima Mitjana (m)	
-15 a 15 (Amb Rang)	2,594 a
-13 a 13 (Amb Rang)	2,577 a
-11 a 11 (Amb Rang)	2,576 a
-9 a 9 (Amb Rang)	2,534 a
-7 a 7 (Amb Rang)	2,533 a
-11 i 11 (Sense Rang)	2,529 a
-5 a 5 (Amb Rang)	2,526 a
-15 i 15 (Sense Rang)	2,521 a
-13 i 13 (Sense Rang)	2,521 a
-5 i 5 (Sense Rang)	2,510 a
-3 a 3 (Amb Rang)	2,506 a
-7 i 7 (Sense Rang)	2,498 a
-9 i 9 (Sense Rang)	2,495 a
-3 i 3 (Sense Rang)	2,494 a
-1 i 1 (Sense Rang)	2,452 a
1 i 1 (Sense Rang)	2,444 a
-1 i -1 (Sense Rang)	2,433 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

4.1.1.3. Secció transversal de capçada

En aquest apartat es mostren els resultats obtinguts de secció transversal de capçada per a les combinacions de feixos estudiades i per a diferents mètodes de càlcul. A part dels mètodes tradicionals (*ConvexHull*, secció amplada màxima i secció amplada percentil 95) també s'han tingut en compte els nous mètodes proposats, com són *Alpha Convex Hull* 0,05; 0,1 i 0,2 i *Retícula* 0,05; 0,1 i 0,2.

4.1.1.3.1. Mètodes de càlcul tradicionals

▪ *ConvexHull*

A la **Figura 26** es mostren les seccions transversals de capçada calculades, per a les diferents combinacions de feixos possibles, amb el mètode tradicional *ConvexHull*. A la **Taula 14** es mostren les *llesques* utilitzades per a fer l'anàlisi estadística i a la **Taula 15** la comparació de les mitjanes de la secció transversal.

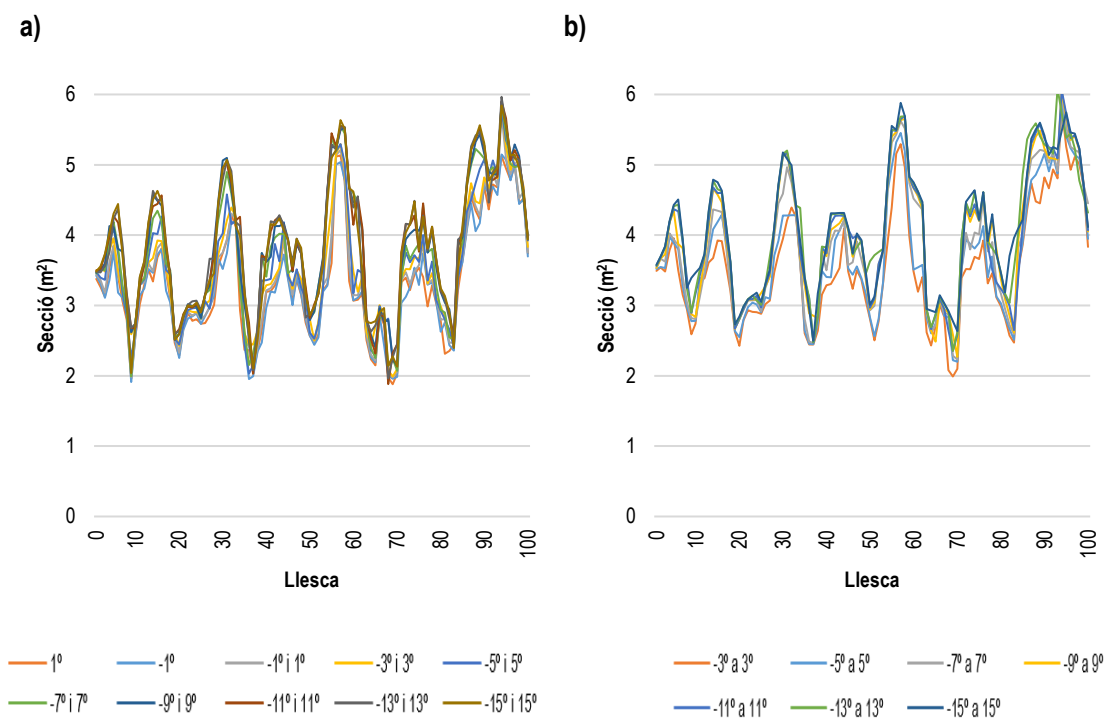


Figura 26. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el mètode tradicional *ConvexHull*. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

Donat que l'algoritme de càlcul d'aquest mètode calcula la secció transversal mitjançant l'ajust d'una polilínia als punts més extrems de les caixes d'anàlisi, es considera que els valors obtinguts de la secció transversal de la filera estudiada estan sobreestimats. Tanmateix, més enllà del valor numèric, el mètode permet obtenir una primera aproximació sobre l'evolució de la secció transversal de la fila en funció de la combinació de feixos utilitzada.

Taula 14. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció *ConvexHull* mitjana.

Nombre de llesques	17
Identificació llesques	44; 68; 69; 14; 6; 11; 41; 88; 39; 77; 57; 64; 51; 48; 61; 25; 13

Taula 15. Separació de mitjanes de la secció *ConvexHull* mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció ConvexHull Mitjana (m²)	
-15 a 15 (Amb Rang)	4,079 a
-13 a 13 (Amb Rang)	3,951 a
-11 a 11 (Amb Rang)	3,900 a
-9 a 9 (Amb Rang)	3,883 a
-13 i 13 (Sense Rang)	3,786 a
-7 a 7 (Amb Rang)	3,765 a
-15 i 15 (Sense Rang)	3,742 a
-11 i 11 (Sense Rang)	3,740 a
-9 i 9 (Sense Rang)	3,728 a
-7 i 7 (Sense Rang)	3,649 a
-5 a 5 (Amb Rang)	3,531 a
-5 i 5 (Sense Rang)	3,443 a
-3 a 3 (Amb Rang)	3,308 a
-3 i 3 (Sense Rang)	3,248 a
-1 i 1 (Sense Rang)	3,222 a
1 i 1 (Sense Rang)	3,122 a
-1 i -1 (Sense Rang)	3,104 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

A la **Taula 15** s'aprecia el mateix patró que s'ha comentat als apartats 4.1.1.1 i 4.1.1.2. Les combinacions d'angles més obliqües anomenades com a -15° a $+15^\circ$; -13° a $+13^\circ$; -11° a $+11^\circ$ i -9° a $+9^\circ$, els quals tenen en compte els angles compresos entre aquests límits, se situen a la part superior de la taula, mentre que quan només es contemplen les parelles d'angles aquestes mateixes combinacions es troben a la part central de la taula. A més a més, aquest mètode de càlcul és el que presenta valors de secció transversal més elevats respecte a la resta de mètodes.

A més a més, s'observa una diferència d'aproximadament 1 m^2 de secció respecte al primer valor de la taula (-15° a $+15^\circ$), quan el càlcul s'efectua amb els angles centrals del sensor, és a dir amb les combinacions -1° i -1° ; $+1^\circ$ i $+1^\circ$; -1° i $+1^\circ$.

■ Secció amplada màxima

A la **Figura 27** es mostren les seccions transversals de capçada calculades, per a les diferents combinacions de feixos possibles, amb el mètode tradicional amplada màxima. A la **Taula 16**, es mostren les *llesques* utilitzades per a fer l'anàlisi estadística i a la **Taula 17** la comparació de les mitjanes de la secció transversal.

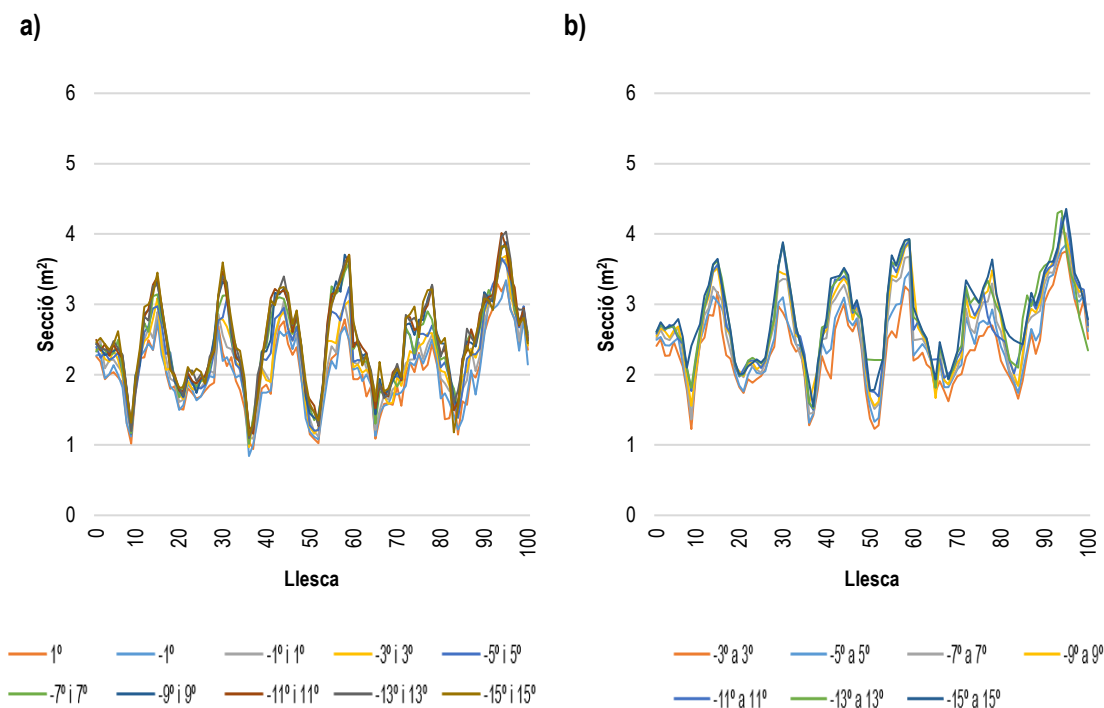


Figura 27. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el mètode tradicional amplada màxima. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

La **Taula 17** demostra que no hi ha diferències significatives entre les combinacions de feixos estudiades en aquest treball per al paràmetre d'estudi secció transversal amplada màxima. A més a més, també cal destacar que pràcticament l'ordre de les combinacions de feixos es manté com a la resta de casos presentats anteriorment. Tanmateix, en aquest cas, la majoria de les combinacions que inclouen els angles intermitjos, excepte la combinació -3° a $+3^\circ$ (Amb rang), se situen a la part alta de la taula esmentada. També, s'observa la tendència, igual que a la resta de figures que es presenten a l'apartat de Resultats, de què les dades de les corbes que tenen en compte els rangs d'angles presenten menys dispersió que les que s'han elaborat tenint en compte, només, les parelles d'angles.

Taula 16. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció amplada màxima mitjana.

Nombre de llesques	9
Identificació llesques	26; 31; 93; 68; 28; 61; 98; 92; 60

Taula 17. Separació de mitjanes de la secció amplada màxima mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció Amplada Màxima Mitjana (m ²)	
-15 a 15 (Amb Rang)	3,081 a
-11 a 11 (Amb Rang)	2,998 a
-13 a 13 (Amb Rang)	2,970 a
-9 a 9 (Amb Rang)	2,949 a
-7 a 7 (Amb Rang)	2,935 a
-5 a 5 (Amb Rang)	2,725 a
-13 i 13 (Sense Rang)	2,657 a
-9 i 9 (Sense Rang)	2,631 a
-7 i 7 (Sense Rang)	2,610 a
-15 i 15 (Sense Rang)	2,605 a
-11 i 11 (Sense Rang)	2,601 a
-3 a 3 (Amb Rang)	2,551 a
-5 i 5 (Sense Rang)	2,531 a
-3 i 3 (Sense Rang)	2,443 a
-1 i 1 (Sense Rang)	2,371 a
-1 i -1 (Sense Rang)	2,226 a
1 i 1 (Sense Rang)	2,209 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

■ Secció Amplada Percentil 95%

A la **Figura 28** es mostren les seccions transversals de capçada calculades, per a les diferents combinacions de feixos possibles, amb el mètode tradicional amplada percentil 95. A la **Taula 18**, es mostren les *llesques* utilitzades per a fer l'anàlisi estadística i a la **Taula 19** la comparació de les mitjanes de la secció transversal.

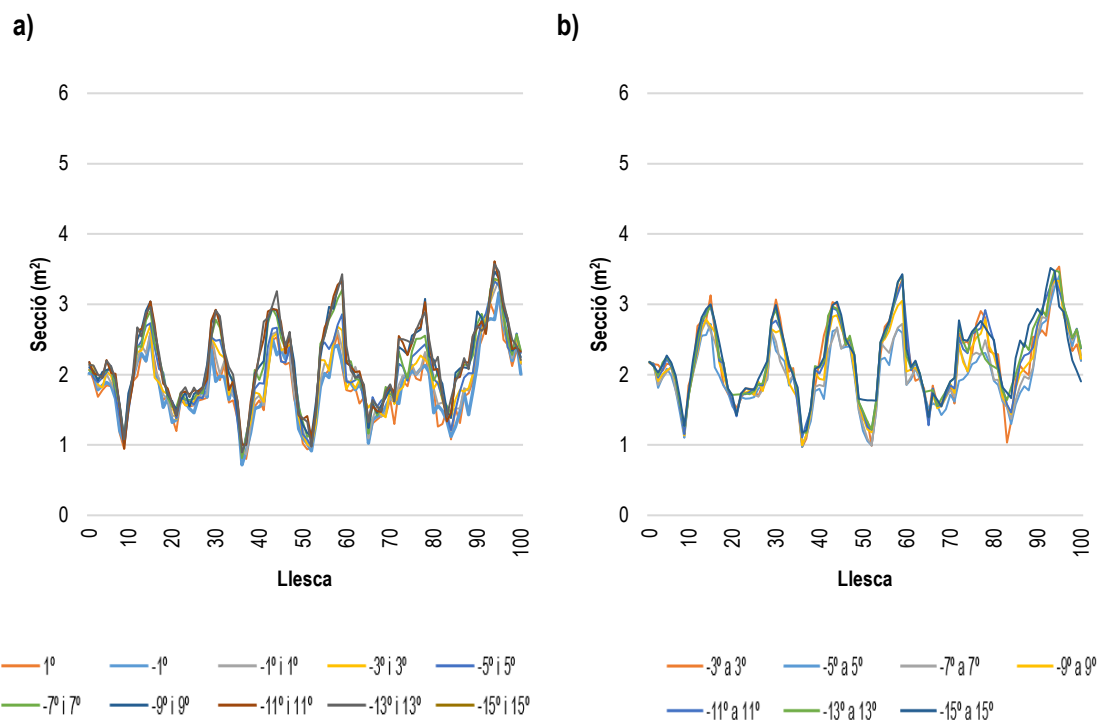


Figura 28. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el mètode tradicional amplada percentil 95. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

La secció transversal mitjana de capçada obtinguda amb el mètode amplada percentil 95 és inferior respecte als valors presentats als apartats anteriors. Els resultats són coherents, ja que aquest mètode calcula la secció tenint en compte l'amplada dels prismes d'anàlisi al 95 % dels punts més centrats. Aquest fet, però, no impedeix que per aquest mètode de càlcul se segueixi el mateix patró que es mostra a la **Taula 19**, destacant les combinacions d'angles més obliqües superior amb els valors més elevats i les combinacions centrals taula amb els valors més baixos de secció transversal.

En aquest cas, tot i obtenir valors de secció inferiors, tampoc s'observen diferències significatives entre les diferents combinacions de feixos estudiades en aquest projecte, el qual permet determinar que qualsevol d'aquestes combinacions pot ser útil per a calcular la secció transversal de capçada amb aquest mètode.

Taula 18. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció amplada percentil 95 mitjana.

Nombre de llesques	19
Identificació llesques	64; 29; 62; 66; 100; 48; 81; 90; 40; 82; 63; 75; 30; 5; 34; 15; 65; 36; 60

Taula 19. Separació de mitjanes de la secció amplada percentil 95 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció Amplada Màxima Mitjana (m²)	
-15 a 15 (Amb Rang)	2,243 a
-13 a 13 (Amb Rang)	2,223 a
-11 a 11 (Amb Rang)	2,182 a
-9 a 9 (Amb Rang)	2,160 a
-15 i 15 (Sense Rang)	2,151 a
-11 i 11 (Sense Rang)	2,122 a
-13 i 13 (Sense Rang)	2,117 a
-9 i 9 (Sense Rang)	2,117 a
-7 a 7 (Amb Rang)	2,076 a
-7 i 7 (Sense Rang)	2,037 a
-5 a 5 (Amb Rang)	1,996 a
-3 a 3 (Amb Rang)	1,977 a
-5 i 5 (Sense Rang)	1,965 a
-3 i 3 (Sense Rang)	1,945 a
-1 i 1 (Sense Rang)	1,868 a
-1 i -1 (Sense Rang)	1,764 a
1 i 1 (Sense Rang)	1,740 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

4.1.1.3.2. Mètodes de càlcul proposats

En aquest apartat s'introdueixen els resultats de secció transversal que s'han obtingut amb els dos nous mètodes de càlcul proposats, *Alpha Convex Hull* i *Retícula*, amb valors d'alfa i de mida de cel·la de 0,05; 0,1 i 0,2.

▪ *Alpha Convex Hull* i $\alpha = 0,05$

La **Figura 29** representa la secció transversal calculada amb el mètode *Alpha Convex Hull* i $\alpha=0,05$ del tram de fila per a les diferents combinacions de feixos. Per altra banda, la **Taula 20** mostra el nombre i la identificació de les *llesques* utilitzades per a l'anàlisi estadística i la **Taula 21** la comparació de mitjanes de la secció transversal calculada amb aquest mètode.

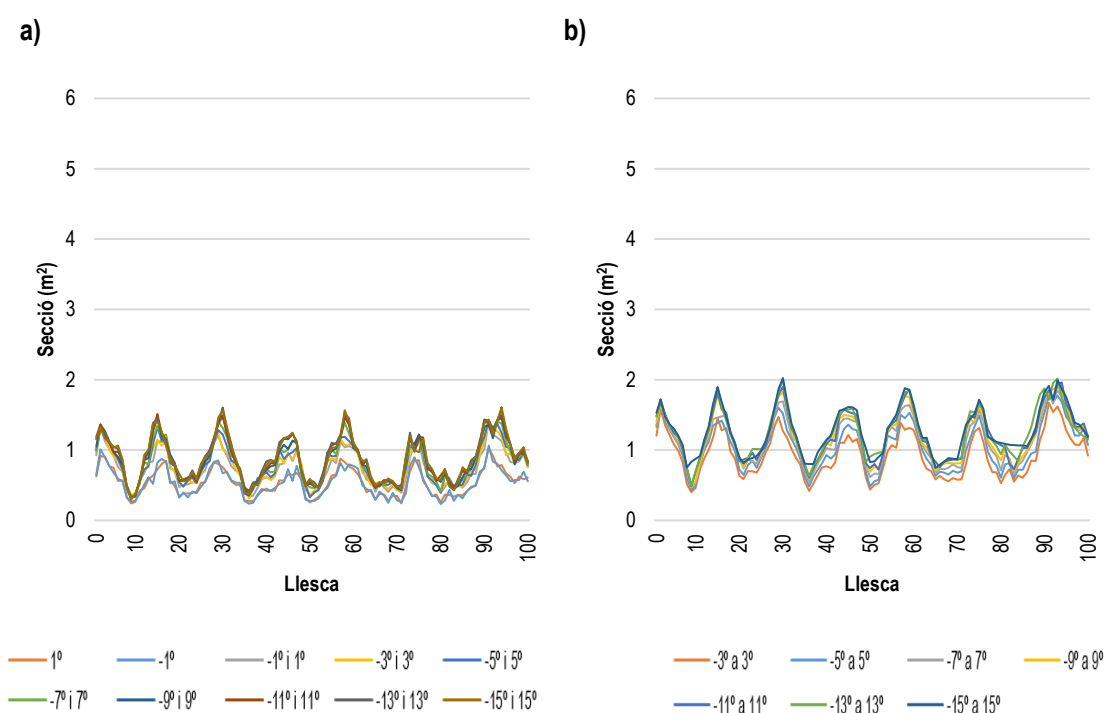


Figura 29. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul *Alpha Convex Hull* amb $\alpha=0,05$. A l'esquerra a) sense rang d'angles i a la dreta b) amb rang d'angles.

Aquest nou mètode de càlcul permet obtenir una representació de la secció transversal molt més ajustada que els mètodes tradicionals. Aquest fet, es deu que els mètodes tradicionals tenen en compte com a secció transversal màxima o des dels extrems, quan en realitat no ho és, ja que trobem alguns buits on no hi ha vegetació. Tot i obtenir uns resultats més ajustats, no es pot obviar l'increment dels requisits computacionals per a poder efectuar els càlculs amb aquest mètode (no estudiats en aquest treball).

En alguns punts del tram de la fila d'anàlisi el mètode *ConvexHull* mostrava una secció d'aproximadament 6 m². Per contra, la secció més gran que presenta aquest mètode, és d'1,4 m². A més a més, en aquest cas, s'evidencia una separació clara entre les combinacions de feixos que

tenen en compte els angles compresos entre les parelles d'angles i les que no. La **Taula 21** demostra com existeix un ordre d'angles de més a menys oblics per als conjunts d'angles amb rang, a excepció de l'alternança entre les combinacions -11° a $+11^\circ$; -13° a $+13^\circ$.

Taula 20. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció *Alpha Convex Hull* 0,05 mitjana.

Nombre de llesques	4
Identificació llesques	92; 99; 41; 4

Taula 21. Separació de mitjanes de la secció *Alpha Convex Hull* 0,05 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció *Alpha Convex Hull* 0,05 Mitjana (m²)

-15 a 15 (Amb Rang)	1,430	a
-11 a 11 (Amb Rang)	1,394	ab
-13 a 13 (Amb Rang)	1,382	ab
-9 a 9 (Amb Rang)	1,364	ab
-7 a 7 (Amb Rang)	1,328	ab
-5 a 5 (Amb Rang)	1,309	ab
-3 a 3 (Amb Rang)	1,167	ab
-13 i 13 (Sense Rang)	1,061	ab
-15 i 15 (Sense Rang)	1,059	ab
-11 i 11 (Sense Rang)	1,040	ab
-7 i 7 (Sense Rang)	1,011	ab
-5 i 5 (Sense Rang)	1,001	ab
-9 i 9 (Sense Rang)	0,998	ab
-3 i 3 (Sense Rang)	0,955	ab
-1 i 1 (Sense Rang)	0,942	ab
-1 i -1 (Sense Rang)	0,679	b
1 i 1 (Sense Rang)	0,674	b

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

A la **Taula 21** s'aprecien diferències de 0,75 m² de secció quan només es té en compte un dels feixos centrals per a fer l'anàlisi (-1° i -1° ; 1° i 1°) respecte quan es tenen en compte la totalitat dels feixos del sensor (-15° a $+15^\circ$).

▪ *Alpha Convex Hull* i $\alpha = 0,1$

La **Figura 30** representa la secció transversal calculada amb el mètode *Alpha Convex Hull* i $\alpha=0,1$ del tram de fila per a les diferents combinacions de feixos. La **Taula 22** mostra el nombre i la identificació de les *llesques* utilitzades per a l'anàlisi estadística i la **Taula 23** la comparació de mitjanes de la secció transversal calculada amb aquest mètode.

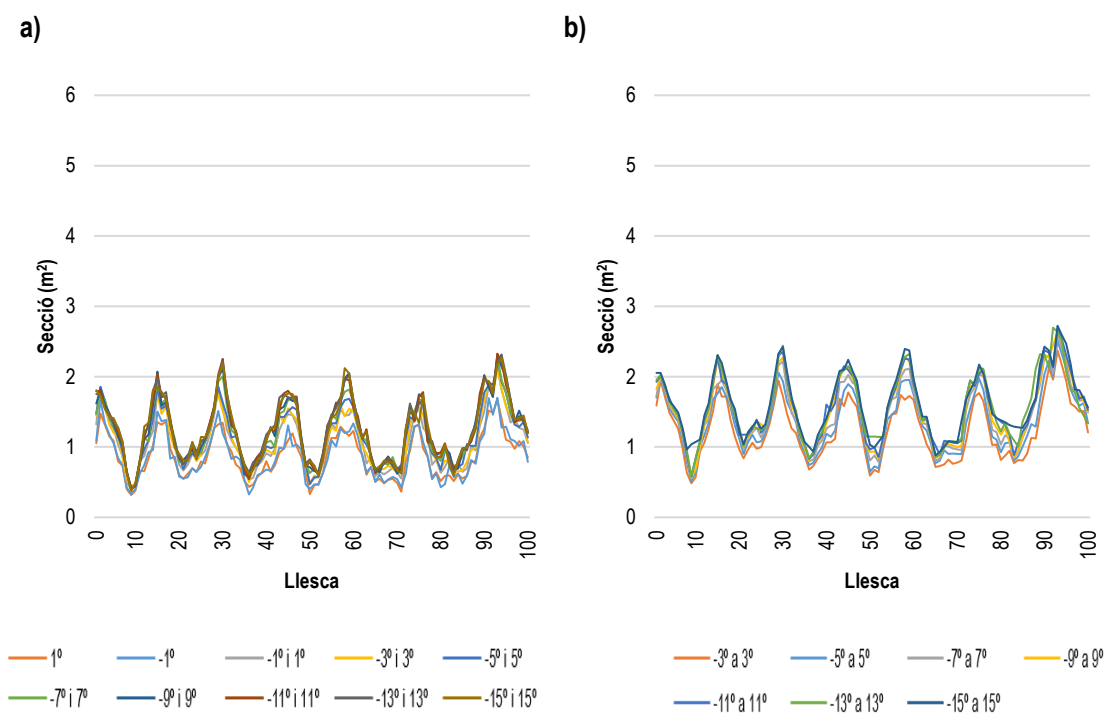


Figura 30. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul *Alpha Convex Hull* amb $\alpha=0,1$. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

El mètode de càlcul *Alpha Convex Hull* i $\alpha=0,1$, de menor ajust que l'anterior, també permet identificar els entrants i sortints de vegetació. Tal com s'observa a la **Figura 30**, tant a l'esquerra (a) com a la dreta (b), al tram 9-10 m es visualitza fàcilment que per una mateixa combinació de feixos, la secció transversal calculada és superior quan es tenen en compte els angles compresos entre les parelles estudiades.

A la **Taula 23** es mostra que no existeixen diferències significatives entre les diverses combinacions de feixos, tot i haver-hi una diferència de gairebé 1 m² de secció de vegetació entre la primera i l'última combinació de feixos.

Taula 22. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció *Alpha Convex Hull* 0,1 mitjana.

Nombre de llesques	7
Identificació llesques	81; 14; 46; 95; 41; 65; 4

Taula 23. Separació de mitjanes de la secció *Alpha Convex Hull* 0,1 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1 Mitjana (m²)	
-15 a 15 (Amb Rang)	1,720 a
-11 a 11 (Amb Rang)	1,652 a
-13 a 13 (Amb Rang)	1,632 a
-9 a 9 (Amb Rang)	1,621 a
-7 a 7 (Amb Rang)	1,531 a
-5 a 5 (Amb Rang)	1,437 a
-15 i 15 (Sense Rang)	1,424 a
-13 i 13 (Sense Rang)	1,413 a
-9 i 9 (Sense Rang)	1,387 a
-11 i 11 (Sense Rang)	1,378 a
-3 a 3 (Amb Rang)	1,321 a
-7 i 7 (Sense Rang)	1,304 a
-5 i 5 (Sense Rang)	1,249 a
-3 i 3 (Sense Rang)	1,170 a
-1 i 1 (Sense Rang)	1,110 a
1 i 1 (Sense Rang)	0,888 a
-1 i -1 (Sense Rang)	0,866 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

▪ *Alpha Convex Hull* i $\alpha = 0,2$

La **Figura 31** representa la secció transversal calculada amb el mètode *Alpha Convex Hull* i $\alpha=0,2$ del tram de fila per a les diferents combinacions de feixos. La **Taula 24** mostra el nombre i la identificació de les *llesques* utilitzades per a l'anàlisi estadística i la **Taula 25** la comparació de mitjanes de la secció transversal calculada amb aquest mètode.

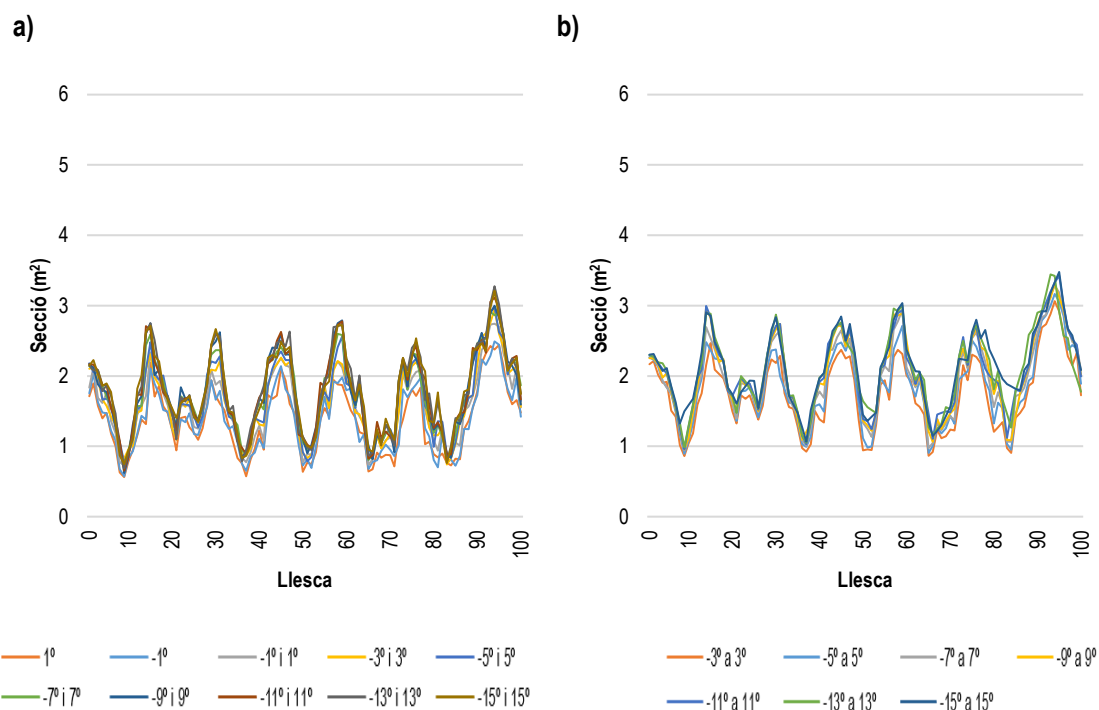


Figura 31. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul *Alpha Convex Hull* amb $\alpha=0,2$. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

A la **Taula 25** es demostra que no existeixen diferències significatives entre les combinacions de feixos estudiades per aquest mètode de càlcul. El patró que segueixen les dades és molt similar al que s'observa amb una resolució de 0,1, tot i ser superiors en aquest cas. És necessari destacar, què en aquest cas, les seccions mitjanes de capçada calculades amb aquest mètode s'assemblen a les que es presenten amb el mètode secció amplada percentil 95.

Taula 24. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció *Alpha Convex Hull* 0,2 mitjana.

Nombre de llesques	10
Identificació llesques	43; 12; 37; 99; 59; 89; 44; 55; 70; 39

Taula 25. Separació de mitjanes de la secció *Alpha Convex Hull* 0,2 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció *Alpha Convex Hull* 0,2 Mitjana (m²)

-15 a 15 (Amb Rang)	2,195	a
-11 a 11 (Amb Rang)	2,173	a
-13 a 13 (Amb Rang)	2,164	a
-9 a 9 (Amb Rang)	2,125	a
-7 a 7 (Amb Rang)	2,046	a
-5 a 5 (Amb Rang)	1,973	a
-11 i 11 (Sense Rang)	1,929	a
-13 i 13 (Sense Rang)	1,906	a
-15 i 15 (Sense Rang)	1,902	a
-9 i 9 (Sense Rang)	1,891	a
-7 i 7 (Sense Rang)	1,865	a
-3 a 3 (Amb Rang)	1,821	a
-5 i 5 (Sense Rang)	1,774	a
-3 i 3 (Sense Rang)	1,705	a
-1 i 1 (Sense Rang)	1,654	a
-1 i -1 (Sense Rang)	1,465	a
1 i 1 (Sense Rang)	1,359	a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

▪ **Retícula i mida cel·la = 0,05**

La **Figura 32** representa la secció transversal calculada amb el mètode Retícula i mida de la cel·la de 0,05 m del tram de fila per a les diferents combinacions de feixos. La **Taula 26** mostra el nombre i la identificació de les *llesques* utilitzades per a l'anàlisi estadística i la **Taula 27** la comparació de mitjanes de la secció transversal calculada amb aquest mètode.

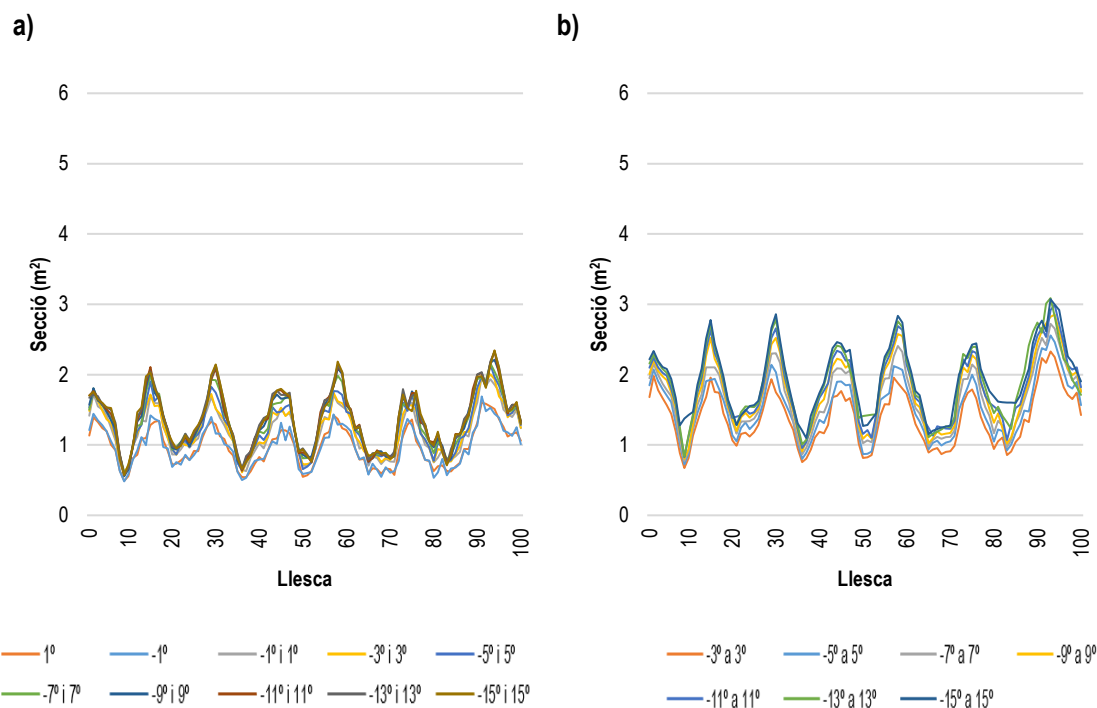


Figura 32. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul Retícula amb mida de la cel·la de 0,05 m. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

Aquest mètode de càlcul es basa a determinar les cel·les quadrades que tenen punts al seu interior i que per tant indiquen que existeix vegetació per a poder calcular la secció transversal. En aquest cas, s'ha utilitzat una resolució de 0,05 m, la qual és propera a la de la mida d'una fulla d'ametller. És necessari destacar que, aquest mètode s'ha escollit aquest mètode com a mètode de referència per a fer les comparacions entre mètodes de càlcul.

Tal com es mostra a la **Figura 32**, també es poden identificar els sortints de vegetació, els quals són de gran interès agronòmic per a dur a terme tractaments individualitzats a escala d'arbre. Visiblement, s'identifica que els valors de secció són superiors quan s'utilitzen les combinacions de feixos que tenen en compte els rangs d'angles, tal com passava amb la resta de mètodes presentats en aquest treball. Aquest fet es corrobora a la **Taula 27**, on s'aprecien dos grans grups, tot i no haver-hi diferències significatives. A la part superior, les combinacions d'angles que tenen en compte tots els feixos i a la part inferior les combinacions que només utilitzen les parelles d'angles en qüestió per a dur a terme el càlcul de la secció transversal de capçada.

Taula 26. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció Reticula 0,05 mitjana.

Nombre de llesques	4
Identificació llesques	2; 24; 78; 47

Taula 27. Separació de mitjanes de la secció Reticula 0,05 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció Reticula 0,05 Mitjana (m²)

-15 a 15 (Amb Rang)	2,039	a
-13 a 13 (Amb Rang)	1,991	a
-11 a 11 (Amb Rang)	1,913	a
-9 a 9 (Amb Rang)	1,886	a
-7 a 7 (Amb Rang)	1,729	a
-5 a 5 (Amb Rang)	1,637	a
-3 a 3 (Amb Rang)	1,502	a
-15 i 15 (Sense Rang)	1,447	a
-13 i 13 (Sense Rang)	1,444	a
-9 i 9 (Sense Rang)	1,443	a
-11 i 11 (Sense Rang)	1,442	a
-7 i 7 (Sense Rang)	1,410	a
-5 i 5 (Sense Rang)	1,340	a
-3 i 3 (Sense Rang)	1,322	a
-1 i 1 (Sense Rang)	1,288	a
-1 i -1 (Sense Rang)	1,069	a
1 i 1 (Sense Rang)	1,036	a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

▪ **Retícula i mida cel·la = 0,1**

La **Figura 33** representa la secció transversal calculada amb el mètode Retícula i mida de la cel·la de 0,1 m del tram de fila per a les diferents combinacions de feixos. La **Taula 28** mostra el nombre i la identificació de les *llesques* utilitzades per a l'anàlisi estadística i la **Taula 29** la comparació de mitjanes de la secció transversal calculada amb aquest mètode.

Tal com s'aprecia a la **Figura 33** i a la **Taula 29**, el mètode Retícula amb una resolució de 0,1 m aporta valors de secció superiors. Aquest fet és lògic, ja que la mida de la cel·la és superior i en alguns casos es pot considerar com a vegetació algunes zones del núvol de punts quan en realitat no ho és, recordem que un sol punt dins la cel·la tota la seva superfície es comptabilitza com a secció.

Una vegada més, no s'observen diferències significatives entre les combinacions de feixos estudiades però sí que s'evidencia el mateix patró, ja comentat anteriorment.

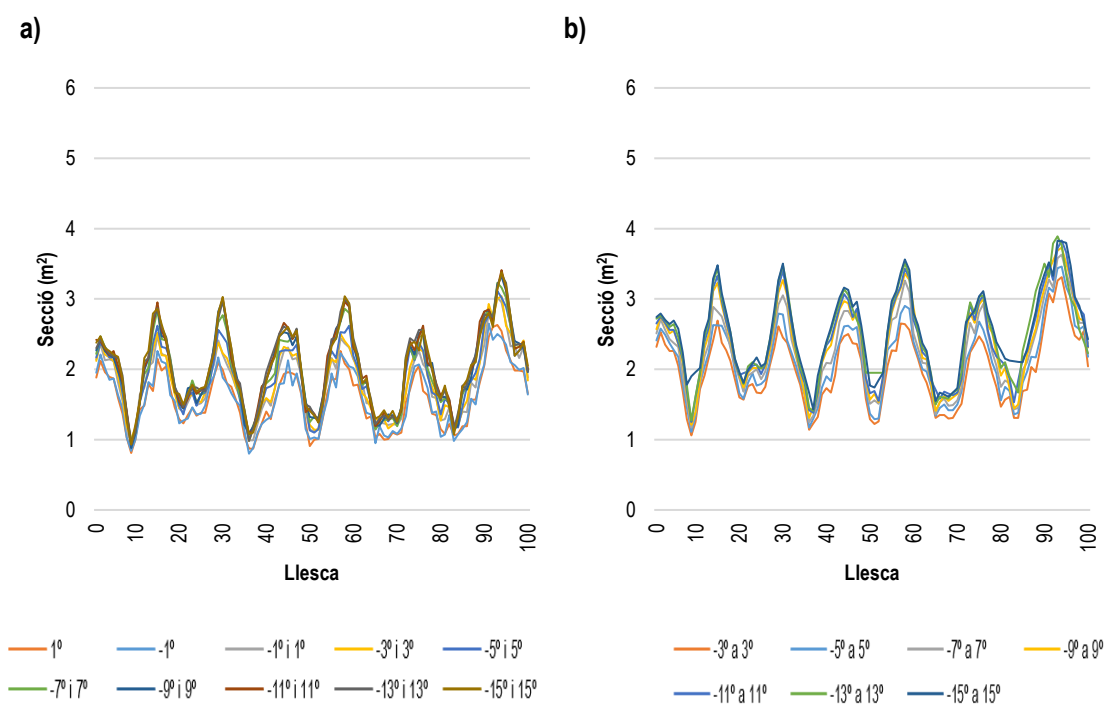


Figura 33. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul Retícula amb mida de la cel·la de 0,1 m. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

Taula 28. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció Retícula 0,1 mitjana.

Nombre de llesques	7
Identificació llesques	56; 7; 5; 66; 63; 94; 83

Taula 29. Separació de mitjanes de la secció Retícula 0,1 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció Retícula 0,1 Mitjana (m²)

-15 a 15 (Amb Rang)	2,559	a
-13 a 13 (Amb Rang)	2,415	a
-11 a 11 (Amb Rang)	2,413	a
-9 a 9 (Amb Rang)	2,356	a
-7 a 7 (Amb Rang)	2,230	a
-5 a 5 (Amb Rang)	2,122	a
-11 i 11 (Sense Rang)	2,053	a
-15 i 15 (Sense Rang)	2,023	a
-13 i 13 (Sense Rang)	2,017	a
-9 i 9 (Sense Rang)	2,006	a
-3 a 3 (Amb Rang)	1,999	a
-7 i 7 (Sense Rang)	1,971	a
-5 i 5 (Sense Rang)	1,901	a
-3 i 3 (Sense Rang)	1,847	a
-1 i 1 (Sense Rang)	1,800	a
1 i 1 (Sense Rang)	1,583	a
-1 i -1 (Sense Rang)	1,579	a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova de Tukey-Kramer.

▪ **Retícula i mida cel·la = 0,2**

La **Figura 34** representa la secció transversal calculada amb el mètode Retícula i mida de la cel·la de 0,2 m del tram de fila per a les diferents combinacions de feixos. La **Taula 30** mostra el nombre i la identificació de les *llesques* utilitzades per a l'anàlisi estadística i la **Taula 31** la comparació de mitjanes de la secció transversal calculada amb aquest mètode.

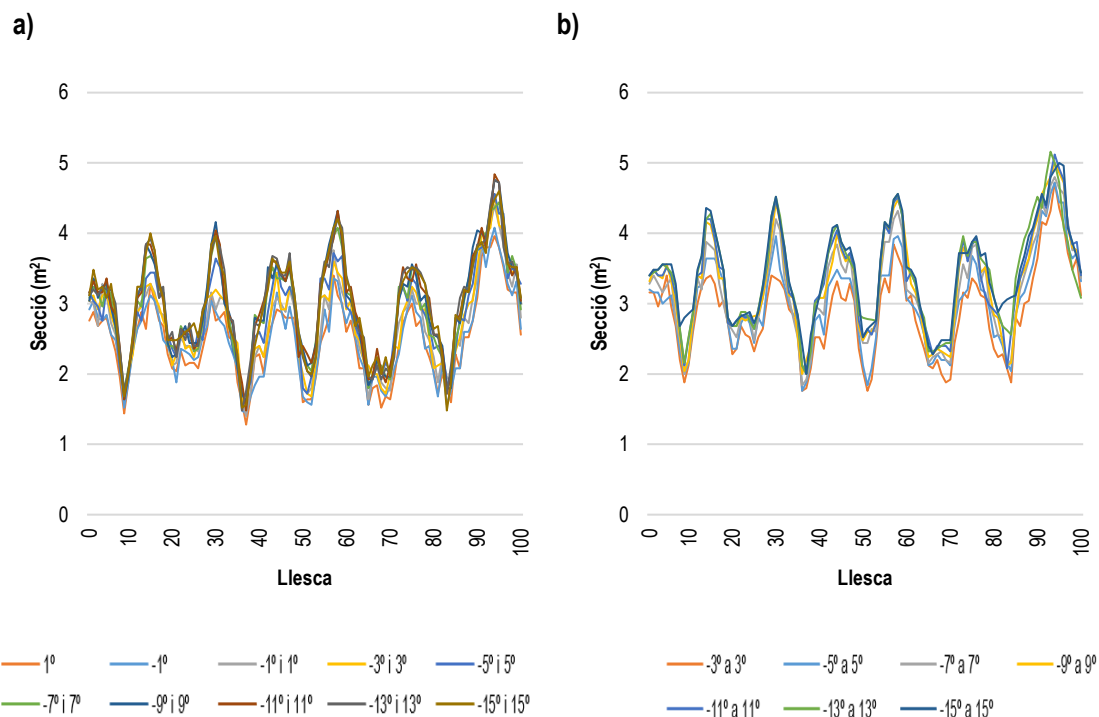


Figura 34. Representació gràfica de la secció transversal de capçada per parelles d'angles i calculada amb el nou mètode de càlcul Retícula amb mida de la cel·la de 0,2 m. A l'esquerra **a)** sense rang d'angles i a la dreta **b)** amb rang d'angles.

Visualment, a la **Figura 34**, es detecta un increment de la secció transversal quan la mida de la cel·la és més gran. Aquests valors són superiors a les seccions que s'han presentat a l'apartat secció amplada màxima. En aquest cas, se segueix el patró comentat anteriorment i a més a més, tampoc s'observen diferències significatives entre les combinacions de feixos estudiades.

Taula 30. Nombre de mostres i identificació de les llesques utilitzades per a dur a terme la separació de mitjanes de les combinacions d'angles de la secció Retícula 0,2 mitjana.

Nombre de llesques	9
Identificació llesques	44; 78; 75; 87; 6; 82; 42; 9; 68

Taula 31. Separació de mitjanes de la secció Retícula 0,2 mitjana calculades amb diferents combinacions d'angles.

Secció Retícula 0,2 Mitjana (m²)	
-15 a 15 (Amb Rang)	3,402 a
-13 a 13 (Amb Rang)	3,248 a
-11 a 11 (Amb Rang)	3,222 a
-9 a 9 (Amb Rang)	3,200 a
-7 a 7 (Amb Rang)	3,133 a
-5 a 5 (Amb Rang)	2,942 a
-13 i 13 (Sense Rang)	2,898 a
-15 i 15 (Sense Rang)	2,884 a
-9 i 9 (Sense Rang)	2,876 a
-11 i 11 (Sense Rang)	2,831 a
-7 i 7 (Sense Rang)	2,827 a
-3 a 3 (Amb Rang)	2,738 a
-5 i 5 (Sense Rang)	2,720 a
-3 i 3 (Sense Rang)	2,618 a
-1 i 1 (Sense Rang)	2,538 a
-1 i -1 (Sense Rang)	2,400 a
1 i 1 (Sense Rang)	2,324 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

4.1.2. Resum de les combinacions de feixos estudiades

Les combinacions de feixos del sensor Velodyne VLP-16 (**Taula 9**) estudiades en aquest treball experimental permeten detectar, amb els diferents mètodes de càlcul utilitzats, sortints i forats de vegetació que poden ser molt interessants des d'un punt de vista agronòmic. Per exemple, si es disposés de la caracterització completa d'una plantació fructícola i es detectessin diferències entre arbres, es podrien ajustar els tractaments fitosanitaris per al control de plagues i malalties i individualitzar les dosis d'aplicació per a cada arbre.

Visualment, tal com s'observa en les diferents figures de l'apartat 4.1.1 les quals representen els paràmetres vegetatius per al tram de fila estudiada, hi ha una clara diferència entre utilitzar només els feixos centrals (1° i -1°) i els feixos més oblics (a partir de -9° a 9° fins a -15° a 15°). A més a més, per una mateixa combinació de feixos, s'observa com els valors obtinguts amb els angles compresos entre els límits establerts són superiors respecte a les combinacions que només tenen en compte les parelles d'angles en qüestió i que també s'aprecia, visualment, a més d'una menor variabilitat entre les dades estudiades.

Des del punt de vista estadístic, aquestes diferències no s'aprecien en les separacions de mitjanes que s'han analitzat amb el test HSD de Tukey de manera que els resultats obtinguts per un únic feix i els resultats obtinguts per a tots els feixos són estadísticament iguals.

Més enllà de si existeixen o no diferències significatives és important que, per a garantir la robustesa de la combinació optima de feixos, l'ordre de les combinacions estudiades es mantingui en les diferents anàlisis realitzades. A efecte de resum s'ha elaborat la **Taula 32**, la qual mostra l'ordre de les combinacions de feixos per a la separació de mitjanes de cada mètode de càlcul, per al paràmetre secció transversal de capçada. Aquesta taula permet distingir tres grans grups:

- a) Els feixos oblics amb rang d'angles (-9° a 9° , -11° a 11° , -13° a 13° , -15° a 15°).
- b) Totes les combinacions d'angles possibles sense rang d'angles, excepte -1° i -1° , 1° i 1° ; -1° i 1° , per una banda, i per altra, les combinacions amb rang d'angles de poca envergadura, angles no massa grans, -3° a 3° , -5° a 5° ; -7° a 7° .
- c) els feixos centrals (-1° i -1° , 1° i 1° ; -1° i 1°).

Les combinacions de feixos incloses als grups **a)** i **c)** sempre se situen a la part alta i a la part baixa de l'ordre de la taula, respectivament. En canvi, l'ordre de les combinacions de feixos incloses al grup **b)** alguns cops es manté i altres s'altera. Per tant, és convenient escollir alguna de les combinacions que es troba dins dels grups **a)** i **c)** per a dur a terme el càlcul de la resta de paràmetres vegetatius, i que dependrà en funció dels objectius que es vulguin aconseguir.

Des del punt de vista teòric, les combinacions compreses dins del grup **a)** són les més obliqües i per tant poden captar punts que no són visibles per altres combinacions de feixos (Punts que es capturen de la part interna de la vegetació). A la **Figura 35** s'ha estudiat com varien els punts obtinguts en una secció transversal de 10 cm de profunditat (projectada al pla Y-Z) segons les combinacions de feixos. S'aprecia com la densitat de punts augmenta a les zones internes de la secció a mesura que s'incorporen feixos de llum a l'anàlisi dels paràmetres vegetatius i que les zones més externes, visiblement, no augmenten. Aquest fet condueix a pensar que els resultats que s'obtenen amb les combinacions que permeten capturar els punts interns, és a dir, les combinacions que contenen els angles més oblics, ajuden a caracteritzar la vegetació amb major fiabilitat.

Taula 32. Ordre del la combinació de feixos per a cada mètode de càlcul utilitzant un nombre de mostres aleatòries (*Power Calculation*: Nivell de significació=0,05 i Potència=0,90). Paràmetre estudiat: Secció transversal mitjana (m²).

ConvexHull		Retícula 0,2		S. Amplada Màxima		Retícula 0,1		S. Amplada Percentil 95		Alpha Convex Hull 0,2		Retícula 0,05		Alpha Convex Hull 0,1		Alpha Convex Hull 0,05	
4,079	-15 a 15 (Amb Rang)	3,402	-15 a 15 (Amb Rang)	3,081	-15 a 15 (Amb Rang)	2,559	-15 a 15 (Amb Rang)	2,243	-15 a 15 (Amb Rang)	2,195	-15 a 15 (Amb Rang)	2,039	-15 a 15 (Amb Rang)	1,720	-15 a 15 (Amb Rang)	1,430	-15 a 15 (Amb Rang)
3,951	-13 a 13 (Amb Rang)	3,248	-13 a 13 (Amb Rang)	2,998	-11 a 11 (Amb Rang)	2,415	-13 a 13 (Amb Rang)	2,223	-13 a 13 (Amb Rang)	2,173	-11 a 11 (Amb Rang)	1,991	-13 a 13 (Amb Rang)	1,652	-11 a 11 (Amb Rang)	1,394	-11 a 11 (Amb Rang)
3,900	-11 a 11 (Amb Rang)	3,222	-11 a 11 (Amb Rang)	2,970	-13 a 13 (Amb Rang)	2,413	-11 a 11 (Amb Rang)	2,182	-11 a 11 (Amb Rang)	2,164	-13 a 13 (Amb Rang)	1,913	-11 a 11 (Amb Rang)	1,632	-13 a 13 (Amb Rang)	1,382	-13 a 13 (Amb Rang)
3,883	-9 a 9 (Amb Rang)	3,200	-9 a 9 (Amb Rang)	2,949	-9 a 9 (Amb Rang)	2,356	-9 a 9 (Amb Rang)	2,160	-9 a 9 (Amb Rang)	2,125	-9 a 9 (Amb Rang)	1,886	-9 a 9 (Amb Rang)	1,621	-9 a 9 (Amb Rang)	1,364	-9 a 9 (Amb Rang)
3,786	-13 i 13 (Sense Rang)	3,133	-7 a 7 (Amb Rang)	2,935	-7 a 7 (Amb Rang)	2,230	-7 a 7 (Amb Rang)	2,151	-15 i 15 (Sense Rang)	2,046	-7 a 7 (Amb Rang)	1,729	-7 a 7 (Amb Rang)	1,531	-7 a 7 (Amb Rang)	1,328	-7 a 7 (Amb Rang)
3,765	-7 a 7 (Amb Rang)	2,942	-5 a 5 (Amb Rang)	2,725	-5 a 5 (Amb Rang)	2,122	-5 a 5 (Amb Rang)	2,122	-11 i 11 (Sense Rang)	1,973	-5 a 5 (Amb Rang)	1,637	-5 a 5 (Amb Rang)	1,437	-5 a 5 (Amb Rang)	1,309	-5 a 5 (Amb Rang)
3,742	-15 i 15 (Sense Rang)	2,898	-13 i 13 (Sense Rang)	2,657	-13 i 13 (Sense Rang)	2,053	-11 i 11 (Sense Rang)	2,117	-13 i 13 (Sense Rang)	1,929	-11 i 11 (Sense Rang)	1,502	-3 a 3 (Amb Rang)	1,424	-15 i 15 (Sense Rang)	1,167	-3 a 3 (Amb Rang)
3,740	-11 i 11 (Sense Rang)	2,884	-15 i 15 (Sense Rang)	2,631	-9 i 9 (Sense Rang)	2,023	-15 i 15 (Sense Rang)	2,117	-9 i 9 (Sense Rang)	1,906	-13 i 13 (Sense Rang)	1,447	-15 i 15 (Sense Rang)	1,413	-13 i 13 (Sense Rang)	1,061	-13 i 13 (Sense Rang)
3,728	-9 i 9 (Sense Rang)	2,876	-9 i 9 (Sense Rang)	2,610	-7 i 7 (Sense Rang)	2,017	-13 i 13 (Sense Rang)	2,076	-7 a 7 (Amb Rang)	1,902	-15 i 15 (Sense Rang)	1,444	-13 i 13 (Sense Rang)	1,387	-9 i 9 (Sense Rang)	1,059	-15 i 15 (Sense Rang)
3,649	-7 i 7 (Sense Rang)	2,831	-11 i 11 (Sense Rang)	2,605	-15 i 15 (Sense Rang)	2,006	-9 i 9 (Sense Rang)	2,037	-7 i 7 (Sense Rang)	1,891	-9 i 9 (Sense Rang)	1,443	-9 i 9 (Sense Rang)	1,378	-11 i 11 (Sense Rang)	1,040	-11 i 11 (Sense Rang)
3,531	-5 a 5 (Amb Rang)	2,827	-7 i 7 (Sense Rang)	2,601	-11 i 11 (Sense Rang)	1,999	-3 a 3 (Amb Rang)	1,996	-5 a 5 (Amb Rang)	1,865	-7 i 7 (Sense Rang)	1,442	-11 i 11 (Sense Rang)	1,321	-3 a 3 (Amb Rang)	1,011	-7 i 7 (Sense Rang)
3,443	-5 i 5 (Sense Rang)	2,738	-3 a 3 (Amb Rang)	2,551	-3 a 3 (Amb Rang)	1,971	-7 i 7 (Sense Rang)	1,977	-3 a 3 (Amb Rang)	1,821	-3 a 3 (Amb Rang)	1,410	-7 i 7 (Sense Rang)	1,304	-7 i 7 (Sense Rang)	1,001	-5 i 5 (Sense Rang)
3,308	-3 a 3 (Amb Rang)	2,720	-5 i 5 (Sense Rang)	2,531	-5 i 5 (Sense Rang)	1,901	-5 i 5 (Sense Rang)	1,965	-5 i 5 (Sense Rang)	1,774	-5 i 5 (Sense Rang)	1,340	-5 i 5 (Sense Rang)	1,249	-5 i 5 (Sense Rang)	0,998	-9 i 9 (Sense Rang)
3,248	-3 i 3 (Sense Rang)	2,618	-3 i 3 (Sense Rang)	2,443	-3 i 3 (Sense Rang)	1,847	-3 i 3 (Sense Rang)	1,945	-3 i 3 (Sense Rang)	1,705	-3 i 3 (Sense Rang)	1,322	-3 i 3 (Sense Rang)	1,170	-3 i 3 (Sense Rang)	0,955	-3 i 3 (Sense Rang)
3,222	-1 i 1	2,538	-1 i 1	2,371	-1 i 1	1,800	-1 i 1	1,868	-1 i 1	1,654	-1 i 1	1,288	-1 i 1	1,110	-1 i 1	0,942	-1 i 1
3,122	1	2,400	-1 i -1	2,226	-1	1,583	1	1,764	-1	1,465	-1	1,069	-1	0,888	1	0,679	-1
3,104	-1	2,324	1 i 1	2,209	1	1,579	-1	1,740	1	1,359	1	1,036	1	0,866	-1	0,674	1

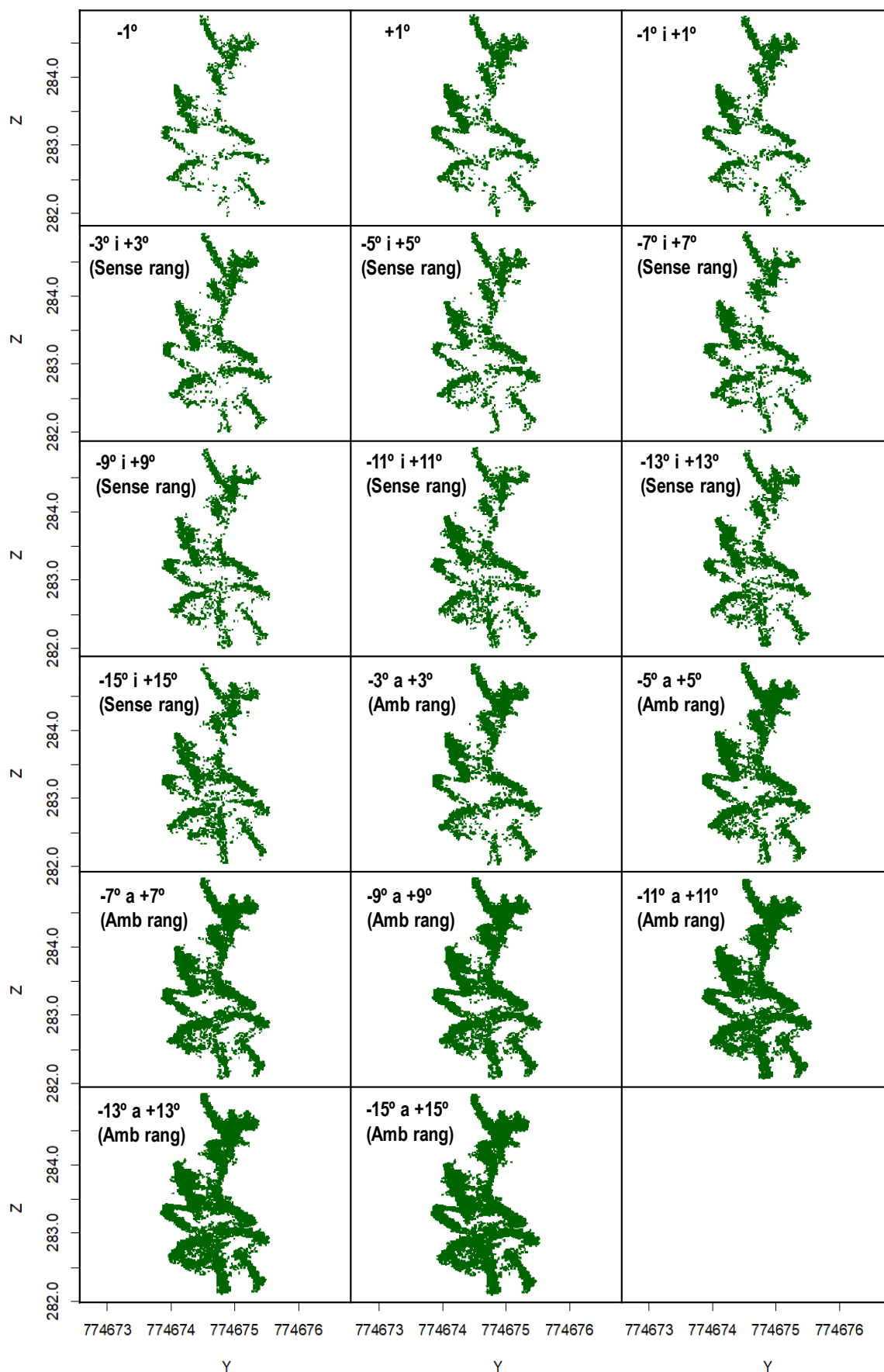


Figura 35. Vista frontal (pla Y-Z) dels punts obtinguts d'una secció transversal de capçada de 10 cm de profunditat segons les diferents combinacions de feixos estudiades.

4.2. Elecció del nou mètode de càlcul de la secció transversal

Tal com s'ha explicat detalladament a l'apartat 4.1, el càlcul de la secció transversal depèn del càlcul (mètode) en qüestió i de la combinació de feixos del sensor LiDAR Velodyne VLP-16 que s'utilitzi. Donat que en aquest treball no es disposa dels valors reals de la secció transversal però sí que es té experiència en els sistemes d'escaneig basats en sensors LiDAR, es pretén aconseguir un mètode de càlcul que permeti determinar la secció transversal de capçada de les files analitzades de forma fiable.

Per tal d'escollir el mètode de càlcul s'han analitzat els resultats obtinguts d'un tram de 10 m de longitud de la fila 43 per a les combinacions de feixos -15° a $+15^\circ$; -13° a $+13^\circ$ i -9° a $+9^\circ$, les quals tenen en compte els rangs intermitjos, ja que, com s'ha justificat anteriorment aquestes combinacions són les que permeten captar un major nombre de punts a la part interna de l'arbre i en conseqüència una millor aproximació dels resultats als valors reals de secció.

A la Figura 36 es representen les seccions transversals de capçada per a cada una de les combinacions esmentades, on s'aprecia com les tres combinacions estudiades permeten detectar entrants i sortints de vegetació, fet molt positiu perquè aquestes zones poden tenir un alt interès des del punt de vista agronòmic. A més a més, l'ordre en termes de magnitud (mitjana de la secció calculada, en m^2) dels diferents mètodes de càlcul també es manté, establint-se del següent ordre, de gran a petit: ConvexHull; Retícula 0,2; Secció amplada màxima; Retícula 0,1; Secció amplada percentil 95; Alpha Convex Hull 0,2; Retícula 0,05; Alpha Convex Hull 0,1; Alpha Convex Hull 0,05.

A la **Taula 33** es mostren els resultats de l'anàlisi estadística que s'ha dut a terme, en la qual s'ha tingut en compte l'efecte de la interacció entre el factor "combinació de feixos" i el factor "mètode de càlcul". Per una banda, cal ressaltar com les combinacions de feixos sempre segueixen el mateix ordre per als diferents mètodes de càlcul i que a mesura que s'utilitzen menys angles la secció transversal de capçada disminueix. Per altra banda, és necessari destacar que existeixen diferències significatives quan es té en compte la interacció entre els dos factors estudiats però que aquestes diferències no es donen entre les combinacions i el mateix mètode de càlcul sinó que es donen, per a la majoria de casos, entre agrupacions d'angles i mètodes.

Donada la dificultat de determinar la secció transversal de capçada de forma manual no es disposa del valor veritat terreny i per tant no es pot determinar amb exactitud quin dels mètodes proposats ajuda a calcular la secció transversal de manera precisa. Tanmateix, es planteja la idea que el mètode de càlcul ha de tenir en compte la superfície mitjana d'una fulla d'ametller, la qual es troba entorn els $12,5 \text{ cm}^2$, segons algunes mesures manuals realitzades en altres plantacions d'ametllers. Entre els diferents mètodes de càlcul utilitzats en aquest treball, el mètode Retícula

amb una mida de la cel·la de 0,05 m és el que més s'aproxima amb aquesta hipòtesi, tot i que encara no es pot afirmar amb claredat que aquest sigui el mètode més òptim. Si bé és cert que sempre s'hauria d'utilitzar el mateix mètode de càlcul per extreure informació dels paràmetres vegetatius i poder-los comparar entre dates d'escaneig. A més a més, des d'un punt de vista computacional, el mètode Reticula és menys exigent que el mètode Alpha Convex Hull degut a l'algorisme de càlcul que s'utilitza.

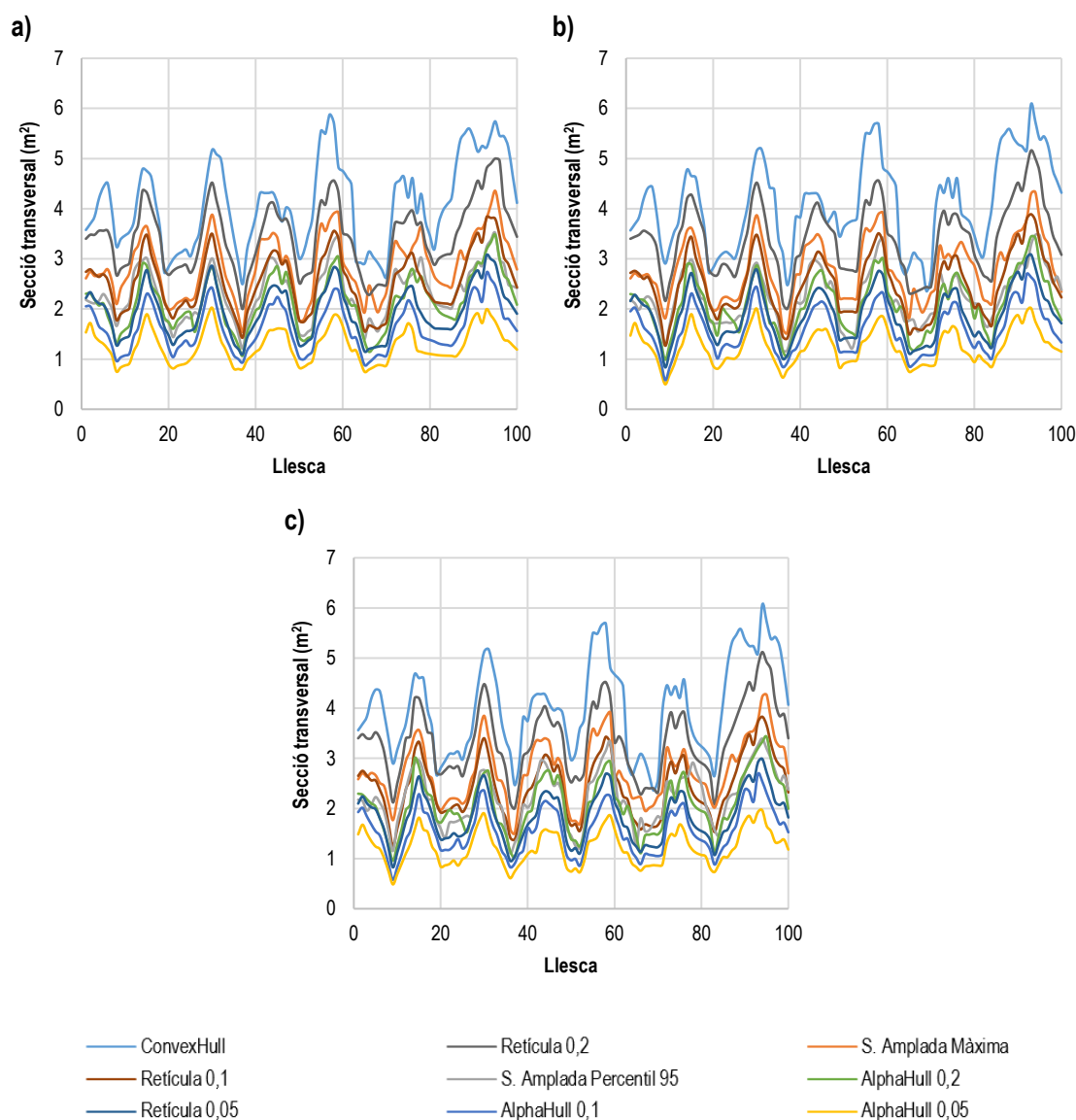


Figura 36. Representació gràfica de la secció transversal segons el mètode de càlcul (tradicionals i proposats) per a les combinacions de feixos: **a)** -15° a +15 (Amb rang d'angles); **b)** -13° a +13° (Amb rang d'angles); **c)** -11° a +11° (Amb rang d'angles).

Taula 33. Separació de mitjanes de la secció transversal mitjana de capçada en funció de les combinacions de feixos i dels nous mètodes de càlcul.

Secció transversal de capçada (m ²)	
-15 a 15 (Amb rang) i Retícula 0,2	3,476 a
-13 a 13 (Amb rang) i Retícula 0,2	3,384 a
-11 a 11 (Amb rang) i Retícula 0,2	3,362 a
-15 a 15 (Amb rang) i Retícula 0,1	2,536 b
-13 a 13 (Amb rang) i Retícula 0,1	2,450 b
-11 a 11 (Amb rang) i Retícula 0,1	2,429 b
-15 a 15 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,2	2,147 c
-13 a 13 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,2	2,068 cd
-11 a 11 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,2	2,056 cd
-15 a 15 (Amb rang) i Retícula 0,05	1,941 cd
-13 a 13 (Amb rang) i Retícula 0,05	1,851 de
-11 a 11 (Amb rang) i Retícula 0,05	1,827 def
-15 a 15 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1	1,601 efg
-13 a 13 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1	1,565 fg
-11 a 11 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,1	1,555 g
-15 a 15 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,05	1,273 h
-13 a 13 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,05	1,220 h
-11 a 11 (Amb rang) i <i>Alpha Convex Hull</i> 0,05	1,218 h

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

Finalment, s'ha dut a terme una correlació entre els resultats obtinguts per a la combinació -15° a $+15^\circ$ (amb rang) entre el mètode de càlcul seleccionat (Retícula 0,05) i la resta de mètodes (**Figura 37**). Per una banda, cal destacar com els resultats presenten un coeficient de determinació superior a 0,9 per als casos estudiats, de manera que les dades es podrien “transformar”, utilitzant la funció de correlació, per intercanviar mètodes de càlcul si en un futur es desitgés canviar la metodologia de treball. Per altra banda, cal observar l'efecte que té utilitzar valors d'alfa elevats (0,2) i mides de cel·la superiors o iguals a 0,2 m. Aquests mètodes són més grollers i per tant no permeten obtenir un ajust acurat del càlcul de la secció, aportant una major dispersió de les dades (**Figura 37 c i e**). Tanmateix, donada la bona correlació amb el mètode Retícula 0,05, aquests mètodes es podrien utilitzar per a fer un estudi preliminar de les seccions transversals de les plantacions d'ametllers.

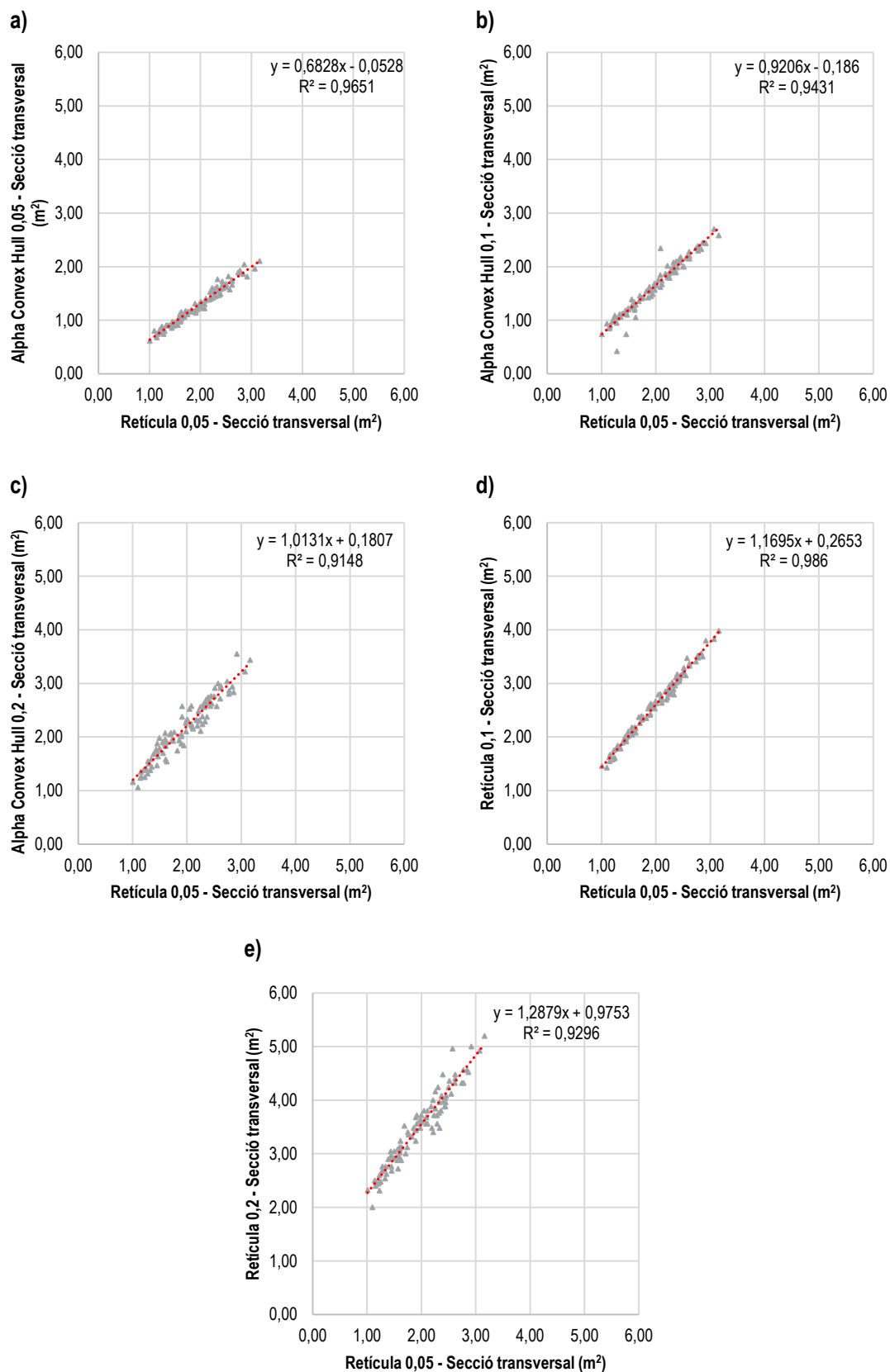


Figura 37. Correlació entre els mètodes de càlcul de la secció transversal per a la combinació de feixos -15° a +15° (Amb rang). **a)** Reticula 0,05 i Alpha Convex Hull 0,5; **b)** Reticula 0,05 i Alpha Convex Hull 0,1; **c)** Reticula 0,05 i Alpha Convex Hull 0,2; **d)** Reticula 0,05 i Reticula 0,1; **e)** Reticula 0,05 i Reticula 0,2.

4.3. Velocitat òptima d'escaneig

En aquest punt, la **Figura 38** mostra com varia la secció transversal de capçada del tram calculada amb el mètode *Alpha Convex Hull* 0,2 del tram de 10 m de la fila 43 estudiat segons la velocitat d'avanç del sistema MTLS (1 km·h⁻¹, 2 km·h⁻¹ i 4 km·h⁻¹) per a la combinació que inclou el rang d'angles de -15° a +15°. Per altra banda, la **Taula 34** mostra una separació de mitjanes per al factor "velocitat d'avanç".

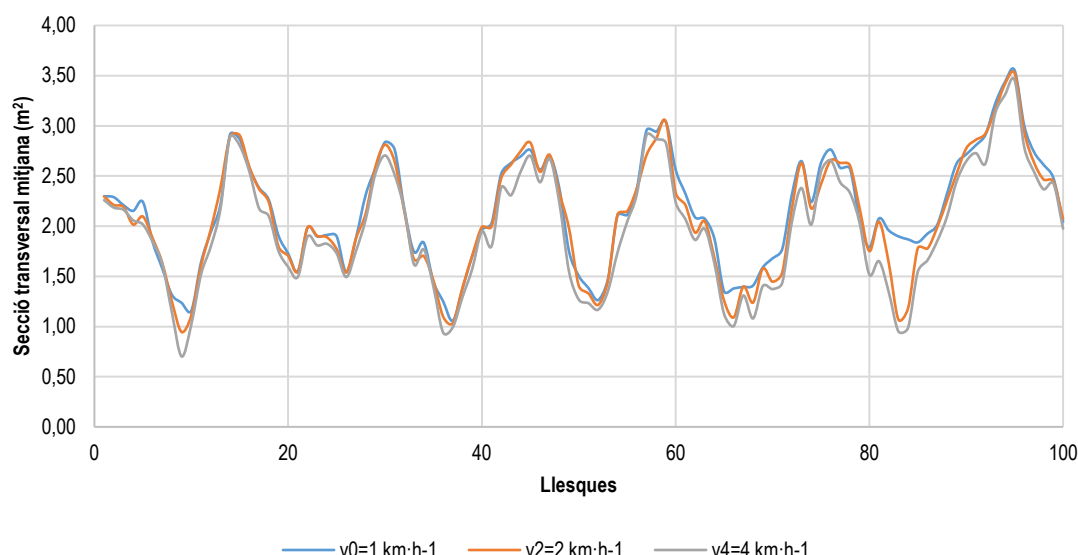


Figura 38. Secció transversal de capçada, calculada amb el mètode *Alpha convex Hull* 0,2, segons les tres velocitats d'avanç estudiades per a les combinacions de feixos a) -1 i 1 i b) -15 a 15 amb rang d'angles.

Tal com s'observa a la **Figura 38**, a mesura que s'incrementa la velocitat d'avanç del sistema d'escaneig, s'origina una lleugera disminució dels valors de secció obtinguts (de menys velocitat a més). Tanmateix, aquesta disminució continua permetent identificar les zones d'interès agronòmic, com són els entrants i sortints de vegetació.

A la **Taula 34** s'observa com, tot i augmentar fins a 4 km·h⁻¹ la velocitat d'avanç del sistema MTLS, el sensor és capaç de detectar suficients punts perquè no es donin diferències significatives entre les velocitats d'avanç utilitzades a camp i la velocitat simulada amb el codi R en aquest treball. Així doncs, es conclou que per al conjunt de velocitats estudiades el sistema d'escaneig podria avançar com a màxim a 4 km·h⁻¹.

Taula 34. Separació de mitjanes de l'anàlisi de velocitats d'avanç del sistema d'escaneig per a la combinació de feixos -15° a +15° (Amb rang). Paràmetre estudiat: Secció transversal de capçada.

Secció transversal de capçada (m²)		
-15 a 15 (Amb rang)	- v0	2,147 a
-15 a 15 (Amb rang)	- v2	2,083 a
-15 a 15 (Amb rang)	- v4	1,972 a

Mitjanes amb lletres diferents indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

4.4. Anàlisi dels paràmetres vegetatius de les files completes

Un cop validat el mètode d'anàlisi dels núvols de punts s'ha procedit a analitzar i estudiar com varien els paràmetres vegetatius, en funció de la data d'escaneig, d'alçada màxima mitjana, amplada màxima mitjana, i secció transversal mitjana de capçada calculada amb el mètode Retícula 0,05 de les files 43, 44 i 45. S'han utilitzat els punts obtinguts per tots els feixos que conformen el sensor Velodyne i per a una velocitat simulada d'escaneig de 4 km·h⁻¹.

4.4.1. Fila d'ametllers número 43

Tal com s'observa a la **Taula 35**, no existeixen grans canvis dels paràmetres vegetatius estudiats per a les diferents dates d'escaneig.

Taula 35. Comparació de les mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats de la fila 43 per a cada data d'escaneig

Data escaneig	Amplada màxima mitjana (m)	Alçada màxima mitjana (m)	Secció transversal mitjana Retícula 0,05 (m ²)
13/06/2018	0,971 b	2,942 a	1,665 b
13/07/2018	1,010 a	2,954 a	1,774 a
01/08/2018	0,994 ab	2,986 a	1,800 a

Mitjanes amb lletres diferents en una mateixa columna indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

Pel que fa a l'amplada màxima mitjana (**Figura 39 a i b**) es detecta un mínim increment entre la primera i l'última data d'escaneig. Per a les tres dates, l'amplada gira entorn el valor mitjà d'1,00 m amb un màxim d'1,65 m i un mínim de 0,35 m, variable segons la posició de la fila. A més a més, segons l'anàlisi estadística duta a terme (**Taula 35**) no s'observen diferències significatives entre la primera i l'última data d'escaneig però sí entre el 13/06/2018 i el 13/07/2018.

Seguint amb l'alçada màxima mitjana (**Figura 39 c i d**), s'observa un lleuger increment d'alçada de vegetació entre el 13/07/2018 i l'01/08/2018, amb una diferència de 4,4 cm. A la **Taula 35** es presenten els valors d'alçada màxima mitjana segons les dates d'escaneig i es demostra com no hi ha hagut un increment significatiu d'alçada entre dates.

Finalment, pel que fa a la secció transversal mitjana de capçada (**Figura 39 e i f**) existeixen increments entre dates d'escaneig que arriben a ser significatius, passant de 1,665 m² a 1,800 m² (**Taula 35**). Aquest fet és raonable segons les dates en què es va escanejar la vegetació.

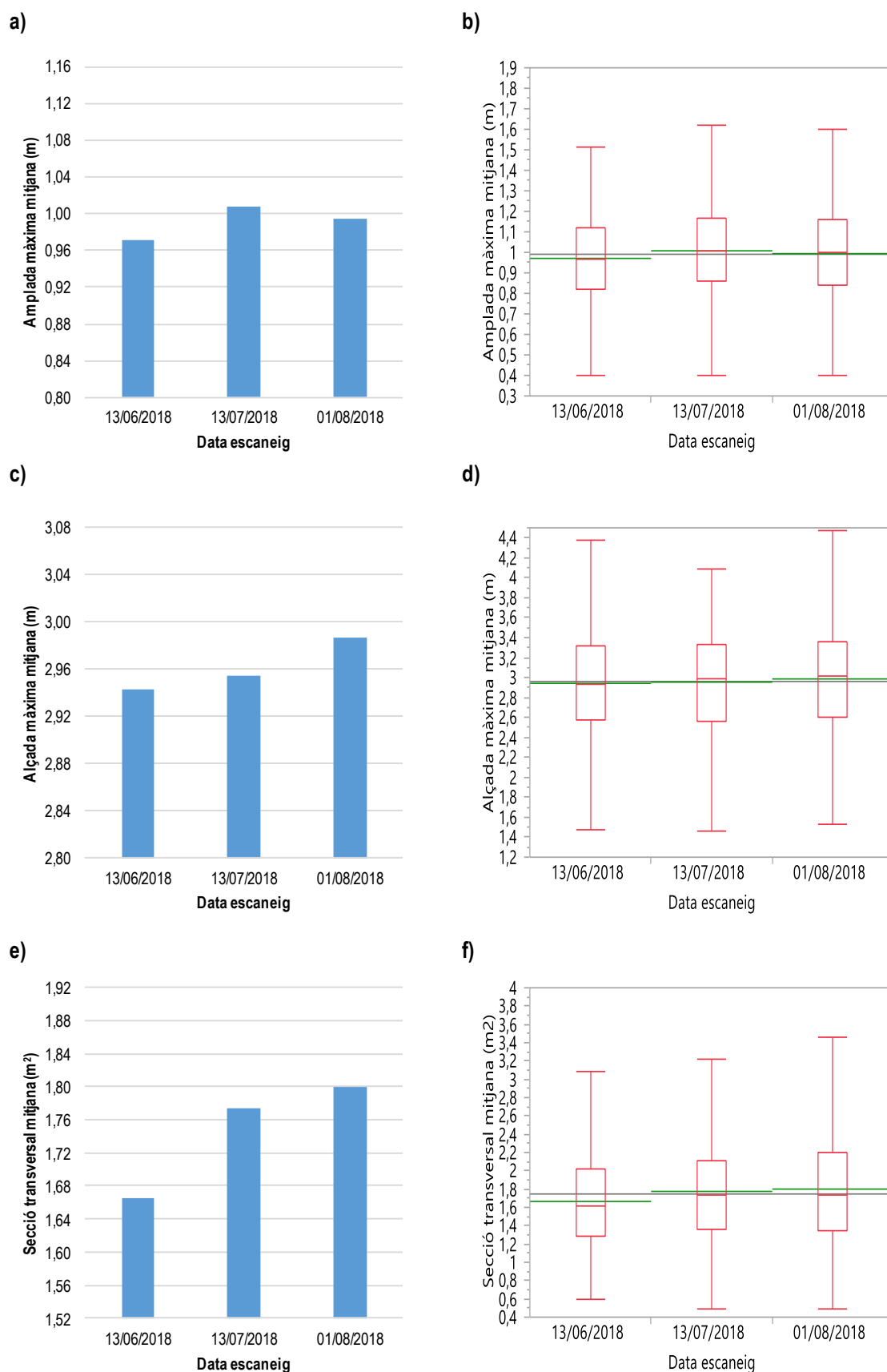


Figura 39. Paràmetres vegetatius de la fila 43 per a les tres dates d'escaneig. **a)** Diagrama de barres de l'amplada màxima i **b)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **c)** Diagrama de barres de l'alçada màxima i **d)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **e)** Diagrama de barres de la secció transversal de capçada i **f)** Diagrama de caixes de les dades estudiades.

4.4.2. Fila d'ametllers número 44

A la **Taula 36** es presenten els resultats de la separació de mitjanes que s'ha dut a terme amb la prova HSD de Tukey amb un nivell de significació de 0,05. A la **Figura 40** es mostren els paràmetres vegetatius estudiats per a la fila 44.

Taula 36. Comparació de les mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats de la fila 44 per a cada data d'escaneig

Data escaneig	Amplada màxima mitjana (m)	Alçada màxima mitjana (m)	Secció transversal mitjana Reticula 0,05 (m ²)
13/06/2018	1,013 a	2,870 b	1,727 a
13/07/2018	1,002 a	2,940 a	1,723 a
01/08/2018	1,014 a	2,902 ab	1,717 a

Mitjanes amb lletres diferents en una mateixa columna indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

Pel que fa als paràmetres vegetatius, s'aprecia com no hi ha hagut un increment de l'amplada màxima mitjana (**Figura 40 a i b**) entre el 13/06/2018 i l'01/08/2018, ja que l'amplada obtinguda per a les tres dates és d'1,00 m aproximadament. Aquest lleuger increment provoca que el creixement vegetatiu en amplada de capçada no hagi estat significatiu, tal com s'observa a la **Taula 36**.

Pel que fa a l'alçada màxima mitjana (**Figura 40 c i d**), s'observa un valor màxim mitjà de 2,940 m per a la data de l'13/07/2018, respecte als 2,870 m i 2,902 m de les dates d'escaneig del 13/06/2018 i 01/08/2018, respectivament. Per tant, es conclou que, tot hi haver-hi aquest valor superior per a la data intermitja, la vegetació no ha sofert un creixement en alçada entre les dates d'escaneig més extremes.

Finalment, per al paràmetre vegetatiu de secció transversal mitjana de capçada (**Figura 40 e i f**) tampoc s'aprecia una lleugera variació entre la secció obtinguda per a les tres dates d'escaneig. Tanmateix, aquests canvis no es manifesten com a significatius en l'anàlisi estadística que s'ha dut a terme i per tant es conclou que el paràmetre secció transversal s'ha mantingut constant entre dates d'escaneig (**Taula 36**).

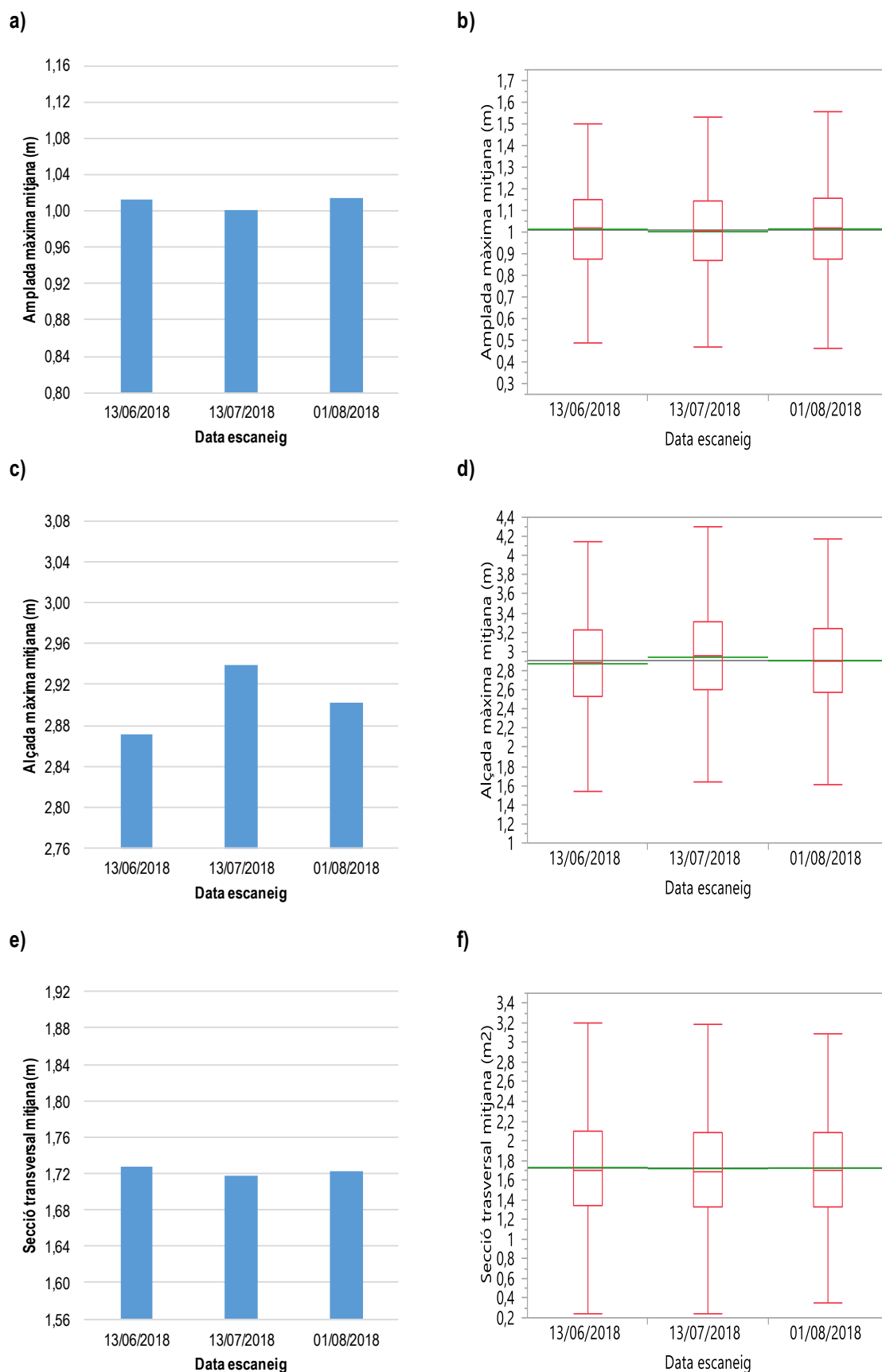


Figura 40. Paràmetres vegetatius de la fila 44 per a les tres dates d'escaneig. **a)** Diagrama de barres de l'amplada màxima i **b)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **c)** Diagrama de barres de l'alçada màxima i **d)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **e)** Diagrama de barres de la secció transversal de capçada i **f)** Diagrama de caixes de les dades estudiades.

4.4.3. Fila d'ametllers número 45

A la **Taula 37** es mostra una separació de mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats segons les dates d'escaneig. A la **Figura 41** es representa l'evolució d'aquests paràmetres per a cada data.

Taula 37. Comparació de les mitjanes dels paràmetres vegetatius estudiats de la fila 43 per a cada data d'escaneig

Data escaneig	Amplada màxima mitjana (m)	Alçada màxima mitjana (m)	Secció transversal mitjana Reticula 0,05 (m ²)
13/06/2018	1,048 b	2,955 b	1,780 b
13/07/2018	1,039 b	3,029 a	1,824 ab
01/08/2018	1,093 a	2,932 b	1,898 a

Mitjanes amb lletres diferents en una mateixa columna indiquen diferències estadístiques amb un nivell de significació $\alpha=0,05$ segons la prova HSD de Tukey.

Pel que fa a l'amplada màxima mitjana (**Figura 41 a i b**) s'aprecia un increment significatiu entre les dates 13/06/2018 i 01/08/2018, sent aquest darrer el superior, amb una amplada d'1,093 m. Cal destacar que l'amplada màxima és molt variable al llarg de la fila analitzada, des de 0,35 m fins a 1,7 m. L'anàlisi estadística duta a terme confirma aquest supòsit i per tant s'accepta la hipòtesi alternativa que existeixen diferències significatives entre dates d'escaneig.

Pel que fa a l'alçada màxima mitjana (**Figura 41 c i d**), es detecta la tendència que s'havia observat amb l'anàlisi de la fila 44. La data 13/07/2020 continua aportant uns valors d'alçada mínimament superiors respecte a les altres dues dates d'escaneig. En aquest cas, fins i tot, el valor obtingut per a la primera data (13/06/2018) és superior al de l'última (01/08/2018), tot i que no es detecten diferències significatives entre aquestes dues dates.

Per acabar, pel que fa a la secció transversal mitjana de capçada (**Figura 41 e i f**), s'observa com hi ha hagut un increment significatiu entre la primera i l'última data d'escaneig, amb una diferència d'aproximadament 11 cm².

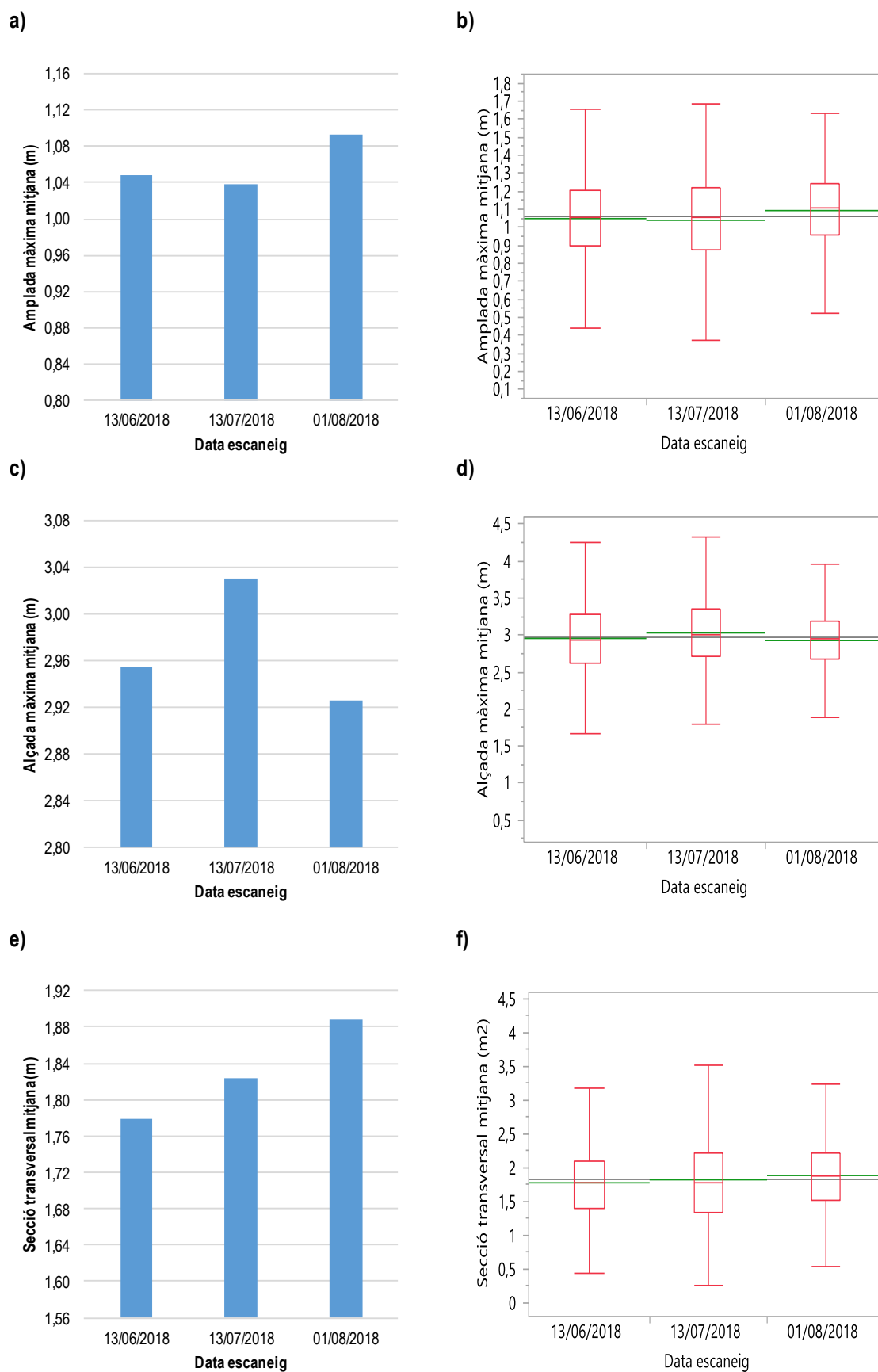


Figura 41. Paràmetres vegetatius de la fila 45 per a les tres dates d'escaneig. **a)** Diagrama de barres de l'amplada màxima i **b)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **c)** Diagrama de barres de l'alçada màxima i **d)** Diagrama de caixes de les dades estudiades; **e)** Diagrama de barres de la secció transversal de capçada i **f)** Diagrama de caixes de les dades estudiades.

5. Discussió

La velocitat d'avanç del sistema d'escaneig, la combinació de feixos del sensor Velodyne que s'utilitza per a dur a terme l'anàlisi de les files i el mètode de càlcul de la secció transversal són factors rellevants a l'hora d'aconseguir una modelització de la vegetació fiable. Obtenir paràmetres geomètrics d'alt interès agronòmic, com per exemple l'amplada, alçada i la secció transversal de capçada, permet la possibilitat que les plantacions fructíferes puguin ajustar les dosis dels recursos emprats (aigua de reg, productes fitosanitaris i fertilitzants, entre altres) segons la variabilitat espacial de l'explotació, en el que es coneix com a agricultura de precisió. És rellevant destacar que en aquest treball es mostren els resultats que s'han obtingut mitjançant un sistema MTLs específic (basat en el sensor LiDAR Velodyne VLP16) i que els resultats podrien variar si el sistema d'escaneig que s'utilitzés fos diferent.

Pel que fa a la recerca de la combinació òptima de feixos, s'ha observat que per a totes les combinacions que s'han estudiat, tant si es tenen en compte els angles compresos entre els angles superiors i inferiors, com si només es contemplen els dos extrems, permeten detectar entrants i sortints de vegetació que poden tenir un interès agronòmic elevat. Un cop duta a terme l'anàlisi estadística utilitzant el mètode *Power Calculation* per a escollir aleatòriament les mostres a estudiar i la prova HSD Tukey-Kramer, s'ha observat que per a la majoria de paràmetres vegetatius que s'han tingut en compte en aquest treball, no existeixen diferències significatives entre les diferents combinacions de feixos. Tanmateix, això no significa que qualsevol d'aquestes combinacions sigui correcta per a extreure paràmetres vegetatius.

Per altra banda, s'ha elaborat la Taula 32 que permet identificar l'ordre de les combinacions (de major resultat a menor) segons el mètode de càlcul emprat. En aquesta, s'aprecia com, les combinacions d'angles -15° a $+15^\circ$; -13° a $+13^\circ$; -11° a $+11^\circ$ i -9° a $+9^\circ$ amb rang sempre se situen a la part alta de la taula, amb poca variació entre elles, i les combinacions que només contemplen els angles centrals del sensor Velodyne (-1° ; $+1^\circ$; -1° i $+1^\circ$) sempre se situen a la part inferior.

A més a més, s'ha dut a terme una representació gràfica (Figura 35) sobre com varien els punts obtinguts per una secció transversal de 10 cm de profunditat en funció del nombre de feixos que s'utilitzen per a dur a terme els càlculs geomètrics. S'ha observat com les zones internes s'emplen amb un major nombre de punts a mesura que s'afegeixen feixos a l'anàlisi dels paràmetres geomètrics. D'aquesta manera, es demostra com les combinacions amb angles oblics que tenen en compte els angles intermitjos sempre aporten valors superiors dels paràmetres vegetatius. Aquest fet no està associat amb un increment de la vegetació cap a les zones externes sinó amb un augment de la densitat de punts capturats a les zones internes de la vegetació.

Una vegada determinada quina és la millor combinació de feixos, s'ha procedit a avaluar els diferents mètodes de càlcul de la secció transversal de capçada. S'ha observat com els nous mètodes proposats (Reticula i Alpha Convex Hull) permeten obtenir valors de vegetació més ajustats respecte als mètodes tradicionals. Cal destacar que s'han obviat els resultats obtinguts per als valors d'alfa i de mida de cel·la de 0,3; 0,4 i 0,5 perquè s'ajusten de forma més grollera i contemplen com a vegetació zones on realment no hi ha punts.

Es parteix de la hipòtesi que el mètode de càlcul ha de contemplar la superfície mitjana d'una fulla d'ametller, propera a 12,5 cm² segons algunes mesures manuals que s'han dut a terme. En aquest treball, aquest supòsit el compleix el mètode Reticula amb una mida de cel·la de 0,05 m. Tanmateix, a causa que no es disposa dels valors reals de secció transversal, no es pot afirmar cap mètode de càlcul com a "millor" o "òptim", però sí que es pot aconsellar que s'utilitzi un mètode que permeti calcular les seccions de forma més ajustada. A més a més, sempre s'haurà d'utilitzar el mateix mètode per a comparar la informació dels paràmetres vegetatius entre dates d'escaneig. També és necessari destacar la bona correlació entre mètodes de càlcul. Aquest fet permetria transformar les dades obtingudes per un mètode de càlcul si en un futur es volgués canviar la metodologia de treball.

Seguidament s'ha dut a terme una comparació entre els resultats obtinguts per a diferents tres velocitats d'avanç, dues utilitzades a camp i una de simulada, i per a la combinació de feixos -15° a +15° (amb rang). S'ha observat com el sistema d'escaneig pot avançar, com a màxim, a una velocitat de 4 km·h⁻¹. Aquesta velocitat d'avanç no és molt satisfactòria, ja que és inferior a altres velocitats d'avanç que s'utilitzen en algunes tasques de camp.

Per acabar, un cop escollida la configuració del sensor i la velocitat d'avanç, s'ha procedit a analitzar les files 43, 44 i 45 per a les tres dates d'escaneig per tal d'observar si per als paràmetres vegetatius estudiats hi va haver increments significatius de vegetació. S'han utilitzat els paràmetres determinats en aquest treball, com són la combinació que inclou tots els feixos del sensor Velodyne, el mètode Reticula 0,05 per a calcular la secció transversal i una velocitat d'avanç de 4 km·h⁻¹. Per a totes elles s'ha observat com, en termes generals, els paràmetres amplada màxima, alçada màxima i secció transversal de capçada han incrementat entre les dates 13/06/2018 i 01/08/2018, tot i que mínimament. En alguns casos, aquest increment ha estat significatiu i en altres no.

6. Avaluació econòmica

Per emprendre un nou negoci és necessari dur a terme una inversió adequada amb els objectius que es volen aconseguir amb el projecte. En aquest cas, la caracterització dels ametllers per tal de determinar paràmetres vegetatius com l'amplada, l'alçada i la secció transversal de capçada, els quals són importants en agricultura. A la **Taula 38** hi figuren els materials i components necessaris, juntament amb el seu cost, per escanejar una plantació amb les característiques que s'han descrit en aquest treball. Així doncs, el conjunt de partides ascendeix a una xifra total de 19250,00 €. L'empresa haurà de ser capaç de generar un flux de caixa anual prou gran per amortitzar la inversió inicial en el període de temps estipulat.

Taula 38: Pagament d'inversió inicial.

Pagament de la inversió	
Concepte	Cost (€)
Sensor LiDAR Velodyne VLP-16	4.000,00
– Sensor de 16 feixos de llum i cablejat del sensor	
Sistema de Georeferenciació amb precisió centimètrica	8.500,00
– Dues antenes i dos receptors de les mateixes característiques (rover + fix)	
Sistema d'adquisició de dades	2.000,00
– Computadora amb memòria per emmagatzemar les dades de camp	
Sistema d'escaneig mòbil	4.500,00
– Plataforma amb erugues de goma, motors de combustió i comandament de control	
Material vari (cablejat i suport)	250,00
– Màncac metàl·lic i connexions entre sensor, sistema de georeferenciació i sistema d'adquisició de dades	
Software adquisició i generació de núvols	3.000,00
– Programa per adquirir les dades de camp i generar els núvols	
Software anàlisi i extracció de resultats	2.000,00
– Programa per analitzar els núvols i extreure els resultats dels paràmetres vegetatius d'interès.	
TOTAL	24.250,00

Per altra banda, s'han calculat les despeses unitàries per a l'escaneig d'una plantació superintensiva d'ametllers, és a dir, amb un marc de plantació d'1,5 m entre arbres i de 3,2 m entre files. A més a més, els preus de mà d'obra i cost de funcionament de la maquinària s'han adaptat en funció de la velocitat d'avanç del sistema, que tal com s'ha determinat en aquest treball, és de 2 km·h⁻¹. Tal com es mostra a la **Taula 39**, les despeses seran de 32,75 €·ha⁻¹. En aquestes, també s'ha contemplat l'assessorament tècnic, imprescindible perquè els resultats que s'obtenen de l'escaneig es puguin traslladar a camp en forma de recomanació.

Taula 39: Despeses per a l'escaneig d'una plantació superintensiva d'ametllers.

Despeses	
Concepte	Cost (€·ha⁻¹)
Mà d'obra	6,50
— <i>Tècnic de camp per maniobrar el sistema d'escaneig</i>	
Cost funcionament maquinària	5,00
— <i>Combustible i manteniment de la plataforma d'avanç</i>	
Assessorament tècnic	15,00
— <i>Recomanació tècnica segons els resultats obtinguts a càrrec d'una persona amb titulació d'Enginyeria Tècnica Agrícola o bé Enginyeria Agrònica</i>	
TOTAL	26,50

Per dur a terme la valoració econòmica (**Taula 40**) s'han considerat els següents paràmetres:

- Preu mínim del servei de 66,50 €·ha⁻¹. Això significa que, un cop restades les despeses unitàries (26,50€·ha⁻¹) l'empresa disposa d'un marge de 40 €·ha⁻¹ destinats a pagar la inversió inicial.
- Un període d'amortització de 5 anys.
- Un interès (r) del 5%.

Tal com s'observa a la **Taula 40**, el flux de caixa anual ha de ser, com a mínim, de 5.601,14 €. Això significa que l'empresa haurà d'escanejar i processar al voltant de 140 ha anuals per tal d'oferir aquest servei a un preu de 66,50 €·ha⁻¹, tal com s'ha esmentat anteriorment.

Taula 40: Valoració econòmica (€).

K0	24.250,00
FC 1..10	5.601,14
r	0,05

t	FC,K	FC,K desc	Acum
0	-24.250,00	-24.250,00	-24.250,00
1	5.601,14	5.334,42	-18.915,58
2	5.601,14	5.080,40	-13.835,18
3	5.601,14	4.838,47	-8.996,71
4	5.601,14	4.608,07	-4.388,64
5	5.601,14	4.388,64	0,00
TIR			5,00%

7. Conclusions

Després de dur a terme l'anàlisi dels núvols de punt LiDAR de les files de la plantació d'ametllers d'Alrasa juntament amb l'aplicació de tots els mètodes de càlcul, es poden extreure les següents conclusions:

- a) L'escaneig de la vegetació amb sistemes basats en sensor LiDAR permet modelitzar els cultius i extreure paràmetres vegetatius com l'amplada, l'alçada i la secció transversal de capçada. Aquest fet permetria ajustar, en un futur, les dosis d'aplicació dels recursos segons la variabilitat espacial de les parcel·les.
- b) S'accepta la hipòtesi que es plantejava a l'inici d'aquest treball que la millor combinació és la que inclou tots els feixos del sensor LiDAR Velodyne. Aquesta combinació permet captar punts a l'interior de la vegetació que no són visibles amb altres combinacions i, en conseqüència, obtenir un millor ajust dels paràmetres vegetatius.
- c) Les possibles combinacions de feixos que configuren el sensor Velodyne VLP-16 permeten detectar entrants i sortints de vegetació, tot i que la utilització dels angles més oblics comporten valors dels paràmetres vegetatius més grans i els angles centrals valors més petits. A més a més, a mesura que s'afegeixen angles a l'anàlisi la dispersió dels resultats disminueix.
- d) Els nous mètodes de càlcul de la secció transversal de capçada permeten obtenir un millor ajust d'aquest paràmetre, segons el valor d'alfa per al mètode *Alpha Convex Hull* o la mida de la cel·la per al mètode Retícula. No es pot determinar quin és el mètode de càlcul òptim a causa que no es disposa dels valors reals, però sí que es juga amb la hipòtesi que el mètode de càlcul ha de tenir en compte la superfície mitjana d'una fulla d'ametller (12,5 cm²). S'escull el mètode Retícula amb una mida de la cel·la de 0,05 m com a nou procediment de càlcul de la secció i es recomana que sempre s'utilitzi el mateix mètode si es volen comparar els resultats obtinguts per a les diferents dates d'escaneig.
- e) S'observa una bona correlació entre el mètode Retícula 0,05 i la resta de mètodes. Aquest fet permet transformar les dades si en un futur es desitgés calcular el paràmetre secció transversal amb un mètode diferent de l'escollit.
- f) La velocitat d'avanç del sistema MTLs hauria de ser de 4 km·h⁻¹ si s'utilitzen tots els feixos de llum amb rang d'angles (-15° i +15°), segons el conjunt de velocitats estudiades.
- g) L'anàlisi de les files completes (43, 44 i 45) presenten increments d'amplada màxima, alçada màxima i secció transversal de capçada entre les dates d'escaneig del 13/06/2018



i l'01/08/2018, essent el paràmetre secció transversal el que sempre presenta un increment significatiu i coherent al creixement dels arbres entre dates.

8. Referències bibliogràfiques

- Arnó, Jaume et al. 2013. "Leaf Area Index Estimation in Vineyards Using a Ground-Based LiDAR Scanner." *Precision Agriculture* 14(3): 290–306.
- Colaço, André F, and Alexandre Escolà. 2018. "Application of Light Detection and Ranging and Ultrasonic Sensors to High-Throughput Phenotyping and Precision Horticulture : Current Status and Challenges." *Horticulture Research*. <http://dx.doi.org/10.1038/s41438-018-0043-0>.
- Escolà, A et al. 2013. "Variable Rate Sprayer . Part 1 – Orchard Prototype : Design , Implementation and Validation." 95: 122–35.
- Escolà, Alexandre et al. 2017. "Mobile Terrestrial Laser Scanner Applications in Precision Fruticulture/Horticulture and Tools to Extract Information from Canopy Point Clouds." *Precision Agriculture* 18(1): 111–32.
- Gené-mola, Jordi et al. 2020. "Fruit Detection , Yield Prediction and Canopy Geometric Characterization Using LiDAR with Forced Air Flow." *Computers and Electronics in Agriculture* 168(November 2019): 105121. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105121>.
- Glennie, Craig. 2016. "Calibration and stability analysis of the VLP-16 laser scanner calibration and stability analysis of the VLP-16 laser scanner." (April).
- Llorens, J, E Gil, J Llop, and A Escola. 2010. "Variable Rate Dosing in Precision Viticulture : Use of Electronic Devices to Improve Application Efficiency." *Crop Protection* 29(3): 239–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2009.12.022>.
- Pierpaoli, Emanuele, Giacomo Carli, Erika Pignatti, and Maurizio Canavari. 2013. "Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review." *Procedia Technology* 8(Haicta): 61–69. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212017313000728>.
- Quentin, P, Tristan Allouis, Olivier Strauss, and Christophe Fiorio. 2018. "DEVELOPING AND VALIDATING A PREDICTIVE MULTI-BEAM LIDARS : APPLICATION TO THE VELODYNE VLP-16." (June 2019).
- Ribeiro, A. 2016. "A LiDAR-Based System to Assess Poplar Biomass." : 155–62.

- Ribes-dasi, Manel et al. 2009. "Agricultural and Forest Meteorology Obtaining the Three-Dimensional Structure of Tree Orchards from Remote 2D Terrestrial LIDAR Scanning." 149: 1505–15.
- Rosell, J R, and R Sanz. 2012. "A Review of Methods and Applications of the Geometric Characterization of Tree Crops in Agricultural Activities." *Computers and Electronics in Agriculture* 81: 124–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.007>.
- Shi, Y, N Wang, R K Taylor, and W R Raun. 2015. "Improvement of a Ground-LiDAR-Based Corn Plant Population and Spacing Measurement System." *Computers and Electronics in Agriculture* 112: 92–101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2014.11.026>.
- Underwood, James P, Calvin Hung, Brett Whelan, and Salah Sukkarieh. 2016. "Mapping Almond Orchard Canopy Volume , Flowers , Fruit and Yield Using Lidar and Vision Sensors." *Computers and Electronics in Agriculture* 130: 83–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.09.014>.